

용접 정밀도 향상을 위한 레이저 용접기의 구조개선 Design of a Laser Welding Machine for the Precision Improvement

노승훈^{1†}, 정평수², 안재우³, 강희태⁴, 이태훈⁴
Seung-Hoon Ro^{1†}, Pyeung-Soo Jeong², Jae-Woo An³,
Hee-Tae Kang⁴, Tae-Hoon Lee⁴

<Abstract>

Laser welding is widely used for precision welding because of superior mechanical properties and high productivity. Generally the accuracy of the welding is determined by the distribution of the bead which is affected by the structural vibrations of the equipment. This study was originated to stabilize a laser welding machine to minimize the bead distribution for the precise joining. The structural properties of the laser welding machine have been investigated to analyze the major factors of the vibrations to cause the bead distribution. The ideas for the design improvement have been applied to the simulation model to identify the effects and further to achieve the stability design and to minimize the bead distribution. The result shows that a few simple design alterations can substantially suppress the structural vibrations and improve the welding accuracy. The procedure used for this study can also be applied to similar welding equipments for improving the structural stability and the welding accuracy.

Keywords : Laser welding, Design Alterations, Improved Stability, Welding Accuracy

1. 서 론

집중된 고출력 단색광을 이용하는 레이저 용접은 에너지 밀도가 높아 용접 시 침투가 용이하며 좁고 깊은 접합부를 용접하는데 적합하다. 또한 수축 및 뒤틀림이 적고 용접부의 강도가 양호하며 생산성이 우수하여 정밀용접에 널리 활용되고 있다.

일반적으로 용접 정밀도는 고정 비드 폭과 산포에 의해서 결정된다. 레이저 용접기의 경우

고정 비드 폭의 조절이 용이하여 용접의 정밀도가 매우 높다. 그러나 가공 및 집합공차가 극히 작은 정밀 구조물을 레이저 용접기로 자동 용접을 진행하는 경우에는 고정 비드 폭과 함께 장비의 진동에 의한 비드 산포가 발생하게 되며 이러한 산포를 억제하기 위해서는 장비의 진동을 최소화 하여야한다.

본 연구는 레이저 용접기를 이용한 자동 용접 시 비드의 산포를 최소화하여 용접 정밀도를 높이기 위한 레이저 용접기의 구조안정화를

¹교신저자, 정회원, 금오공과대학교 기계공학부, 교수, 工博, E-mail:shro@kumoh.ac.kr

²정회원, (주)레이젠, 연구소장

³정회원, (주)현대기전, 대표

⁴정회원, 금오공과대학교 대학원

¹Corresponding Author, Prof., School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Ph. D. R&D lab, Director, Raygen Co., Ltd.

³President, Hyun Dae Mechanics & Electirc co., Ltd.

⁴Graduate School of Kumoh National Institute of Technology

목표로 진행되었다. 이를 위하여 용접기의 동특성을 분석하고 구조물의 주 작동속도 영역 및 전체 작동속도 영역에서 진동의 크기 및 진동의 주된 원인을 조사하였으며 이를 바탕으로 진동의 크기를 억제하기 위한 설계 개선안을 도출하고 이를 적용하여 장비의 진동을 억제하기 위한 최적설계 방안을 찾고자 하였다.¹⁾



Fig. 1. The laser welding machine used for the study.

2. 구조물의 동특성 분석

2.1 진동의 이론적 분석

일반적으로 기계 구조물은 모터, 플라이휠, 스프링, 축 등과 같은 회전체에 편심(회전중심과 질량중심의 차이)이 존재하면 회전과 함께 원심력이 자연 발생되어 진동이 발생하게 된다.

레이저 용접기의 경우 자동 용접을 위한 모터의 작동으로부터 진동이 발생한다. 모터의 작동진동수가 ω , 구조물의 질량, 감쇠, 강성이 각각 m , c , k 일 때 용접기를 1자유도계로 가정하면 진동은 아래의 식과 같은 운동방정식으로 표현된다. 또한 가진력의 크기(f_0)는 회전체의 질량, 편심량 및 회전각속도에 의해 결정되는 원심력에 해당된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_r e \omega^2 \sin \omega t (= f_0 \sin \omega t)$$

위 미분방정식의 해를 구하면 다음과 같고

$$x(t) = X \sin(\omega t - \phi)$$

진동의 크기 X 는 아래와 같이 표현된다.

$$X = \frac{f_0/k}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2)^2 + (2\zeta \frac{\omega}{\omega_n})^2}} \approx \frac{f_0/k}{|1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2|}$$

위 식에서 ζ 는 일반적으로 작은 값으로 무시할 수 있으며 가진원의 작동진동수(ω)가 구조물의 고유진동수($\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$)와 일치하게 되면 위 식의 분모가 0에 근접하여 매우 큰 진동이 유발되며 이 경우를 공진이라 한다. 따라서 레이저 용접기의 진동을 억제하기 위해서는 구조물의 회전부위의 작동진동수 및 고유진동수를 파악하여 이 값들이 근접한 경우 구조물의 고유진동수 변경을 통하여 작동진동수와 고유진동수 간의 공진이 억제되도록 설계하여야 한다.

2.2 주파수 분석 실험

구조안정성 향상을 위한 설계 개선안의 도출을 위해 주파수 분석 실험을 통하여 구조물의 동적 특성을 분석하고 큰 진동의 원인이 되는 고유진동수와 진동형상에 대하여 조사한다.^{2,5)}

2.3 실험 방법 및 결과

실험에 사용된 장비 및 설치 상태는 다음의 Fig. 2, 3 및 Table 1과 같다. 실제 구조물의 주요 부위에 진동 측정을 위한 센서를 부착한 후 임펄스 형태의 힘을 주고 이에 의한 진동을 측정하여 각 부위의 진동의 크기, 진동의 전달 경로, 고유진동수 및 진동 형태 등의 구조 동특성을 파악한다.

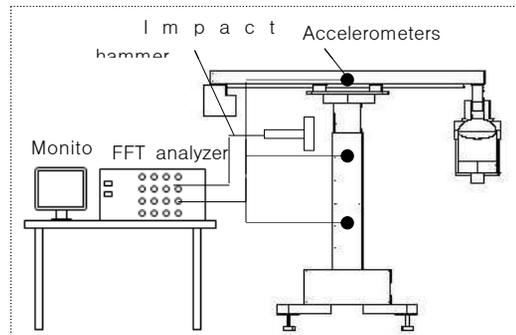


Fig. 2. The setup for the frequency response test.

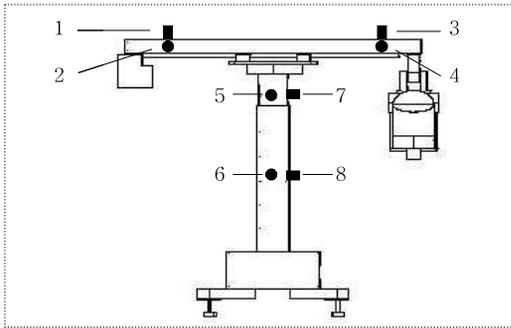


Fig. 3. Locations of the sensors on the laser welding machine.

Table 1. Spec. of the test equipment

Equipments	Spec.	Model	Company
FFT analyzer		DSA 212	Difa Measuring System
Accelerometer		8634b5	Kistler
Impact hammer		DYTR PULSE	Dytran
Laser welding machine		Vision 150	Fasweld

2.3.1 주파수 분석 실험

레이저 용접기의 진동을 분석하기 위하여 앞의 Fig. 3과 같은 위치에 센서를 부착하고 주파수 분석 실험을 하였다. Fig. 4는 주파수 분석 실험 결과이며 1차 고유진동수는 7.5Hz이고 2차 고유진동수는 9.0Hz임을 확인할 수 있다. 센서의 부착위치와 측정된 가속도의 크기 및 방향성을 고려하여 분석된 고유진동수 및 진동형은 Table 2와 같다.

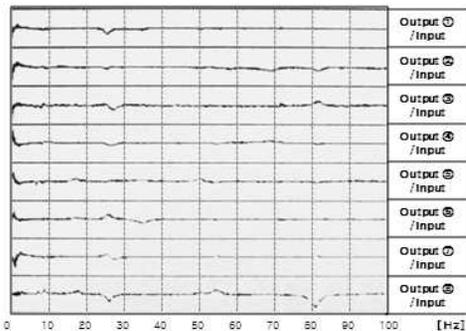


Fig. 4. Transfer functions of the original structure (impact applied on 1 of Fig 3)

Table 2. Natural frequencies and vibration modes of the original structure from experiment

Natural frequencies	Vibration modes (obtained from the test)
1st 7.5Hz	
2nd 9.0Hz	

2.4 컴퓨터 시뮬레이션

다음의 Fig. 5는 컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 구현한 모델이며 이를 통하여 얻어진 고유진동수 및 진동형은 Table 3과 같다. 시뮬레이션 모델을 구현한 후 그에 대한 해석 결과가 실험 결과와 일치하면 모델링이 바르게 구현되었음을 확인할 수 있다.

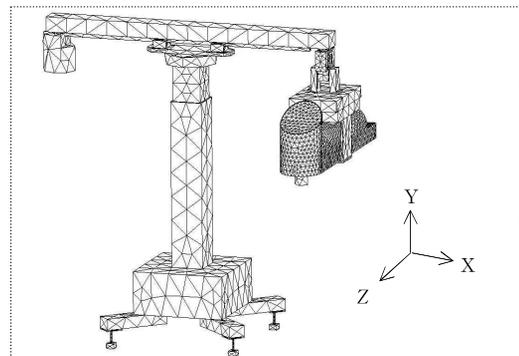


Fig. 5. The simulation model for the analysis of the original structure.

Table 3. Natural frequencies and vibration modes of the simulation model

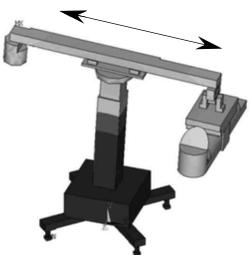
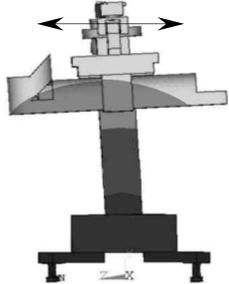
Natural frequencies		Vibration modes (obtained from the simulation)
1st	7.6Hz	
2nd	8.8Hz	
		

Table 4. Natural frequencies from the experiment and the computer simulation

[Unit : Hz]

Natural frequencies \ Analysis	Experiment	Computer simulation
1st	7.5	7.6
2nd	9.0	8.8

실제 구조물에서 측정된 고유진동수와 시뮬레이션 결과는 위의 Table 4와 같다. 두 경우의 상대적 오차는 3% 이하로 실험에 의한 결과와 시뮬레이션에 의한 분석 결과가 잘 일치하고 있다. 따라서 시뮬레이션을 위한 모델링이 잘 구현되었다 할 수 있다. 이 모델의 해석을 통하여 얻어진 진동 특성을 분석하여 설계 개선안을 도출하고 개선안을 모델에 적용하여 개선 효과를 확인하는 과정을 거쳐 안정된 구조 개선안을 찾는다.^{6,7)}

3. 설계 개선안의 도출

연구의 대상인 레이저 용접기의 가장 큰 불안정 원인은 컬럼 상부에 넓게 분포된 질량에 의한 컬럼의 좌우, 앞뒤 방향의 진동(고유진동수 7.5, 9.0Hz에 해당)이다. 따라서 이 진동을 최소화하기 위해서는 구조물의 강성을 높이고 강성 강화에 따른 고유진동수 상승이 작동속도인 8.3, 12.5Hz[500, 750rpm]와의 공진을 유발하지 않도록 설계 개선하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 레이저 용접기의 강성을 강화시킴과 동시에 고유진동수가 작동속도에 비하여 30% 이상 커지도록 설계 개선함을 목표로 설정하였다.

아래 Fig. 6은 레이저 용접기의 좌우 방향 진동을 억제하기 위하여 구조물 상부 프레임 부위의 강성을 강화하기 위한 설계 개선안이다. 상부 프레임의 설계변경을 통하여 구조물 좌우 방향 진동은 일부 억제되었으나 여전히 앞뒤 방향의 진동이 있어 추가 개선이 요구된다.

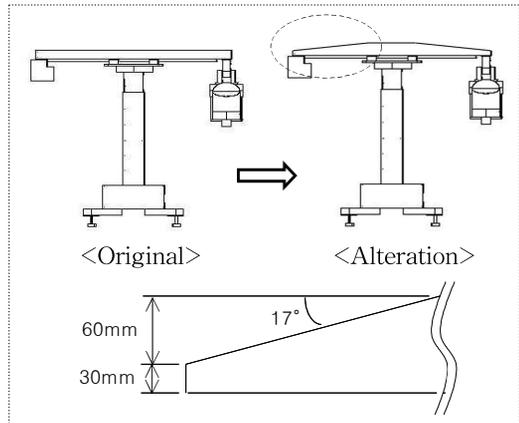


Fig. 6. Design alteration of the upper frame.

Fig. 7은 컬럼의 좌우, 앞뒤 방향의 진동을 억제하기 위하여 컬럼의 하부를 강화하여 구조물의 고유진동수를 높이기 위한 설계 개선안이다. 이 설계 변경안을 통해 구조물의 고유진동수의 증가 및 컬럼 하부 강성강화로 인해 구조물의 진동을 감소시킬 수 있는 효과를 확인하였다.

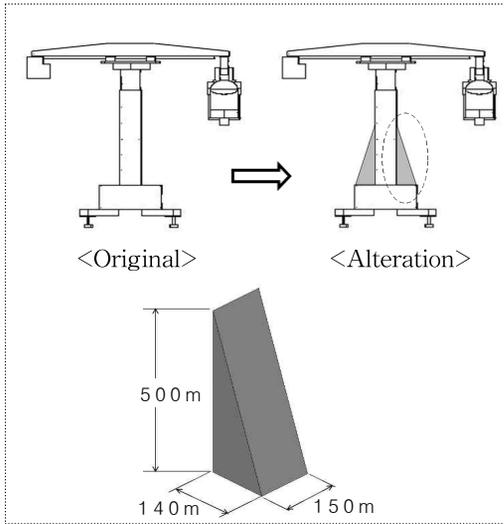


Fig. 7. Design alteration of the column.

아래 Fig. 8은 레벨링 볼트의 직경을 크게 함으로써 지지부의 강성을 강화시키는 설계 개선안으로 지지부의 강성 강화를 통하여 구조물 전체의 진동을 억제하기 위한 설계 개선안이다.

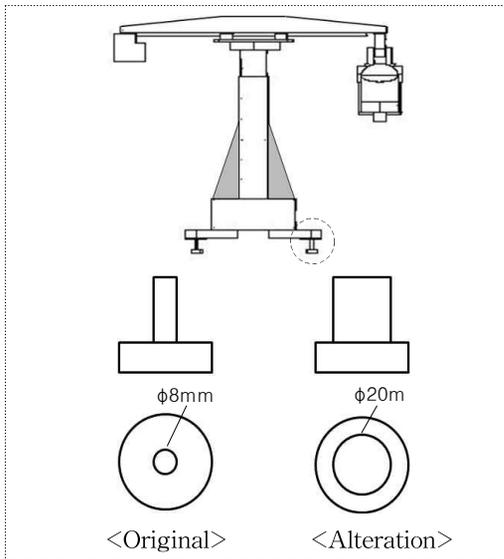


Fig. 8. Design alteration of the leveling bolts.

앞에서 언급된 공진회피 및 진동억제를 위한 설계 개선방향을 바탕으로 간단하고 저비용인 최적 설계안의 내용은 Fig. 6~8에 도시하였으며 그 결과 아래 Table 5와 같은 고유진동수의

증가효과를 얻어 강성 강화와 동시에 작동속도 [8.3, 12.5Hz]와의 공진에서도 충분히 멀어지게 됨을 확인할 수 있다.

Table 5. Natural frequencies of the original structure and the improved structure

[Unit : Hz]

Natural frequencies	Model	Original structure	Improved structure	Natural frequency comparison
1st		7.5	18.6	248% up
2nd		9.0	23.5	261% up

전체적으로 구조물의 강성강화 및 공진 회피로 진동을 억제시킬 수 있으며 설계 개선안을 적용하여 모터의 작동속도에서의 구조물의 진동을 비교한 결과는 아래 Table 6과 같다.

Table 6. Magnitudes of vibrations of the original structure and the improved structure

[Unit : μm]

Magnitudes of vibrations	Model	Original structure	Improved structure	Magnitude comparison
Tool	X	275.01	7.75	97% down
	Y	44.86	1.26	97% down
	Z	151.21	2.92	98% down
				Average magnitude : 97% down

전체적으로 구조물의 설계개선을 통하여 구조물 전체의 강성을 강화하고 고유진동수를 모터 작동속도[8.3, 12.5Hz]에서 멀어지도록 설계 변경함으로써 전체적으로 진동이 크게 감소하였음을 확인할 수 있다.

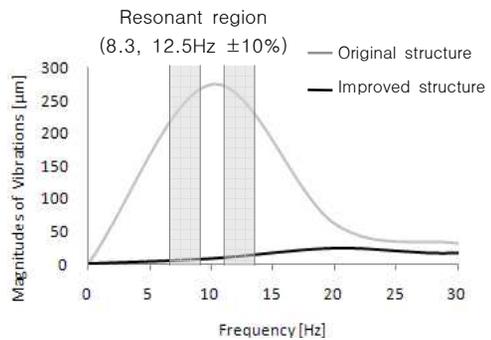


Fig. 9. Magnitudes of vibrations along X direction.

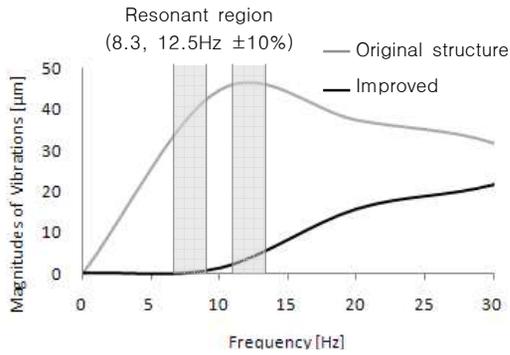


Fig. 10. Magnitudes of vibrations along Y direction.

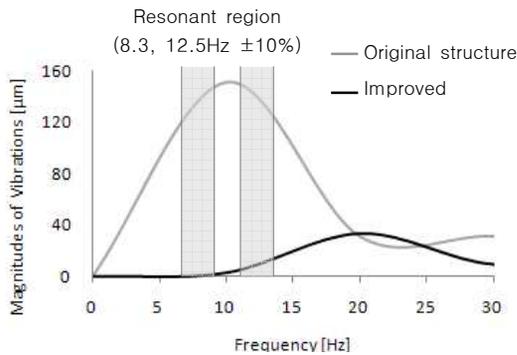


Fig. 11. Magnitudes of vibrations along Z direction.

Fig. 9~11은 작동속도 영역 및 0~30Hz구간에서 기존 구조물과 설계 변경 후의 진동 크기를 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 0~30Hz구간에서 전체 진동은 81% 감소하였으며 작동속도에서의 진동은 97% 감소하였다.

Fig. 12는 위의 결과를 비드 산포에 적용하여 그림으로 표현한 것이다.

모터의 작동에 의한 용접기의 진동을 무시하면 비드폭은 (a)와 같으며 용접기의 진동을 고려하면 기존 구조물의 경우 (b)와 같은 비드폭을 갖게 된다. 설계 개선을 통하여 용접기의 진동을 최소화 한 경우 (c)와 같은 비드폭으로 용접이 진행된다. 본 연구에 사용된 레이저 용접기는 200 μm 의 고정 비드폭(b_0)을 가지므로 기존 구조물의 경우 진동에 의한 비드 산포(275 μm)에 의해 용접 비드 산포가 최대 475 μm (b_1) 수준이며 개선된 구조물의 경우 진동에 의한 비드 산포를 7.75 μm 로 억제시킬 수 있어 용접 정밀도가 207.75 μm (b_2)로 향상된다.

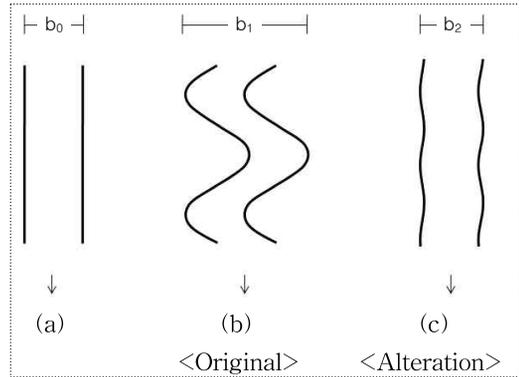


Fig. 12. Comparison of the welding bead distributions.

4. 결론

레이저 용접기의 진동 최소화를 통한 용접 정밀도 제고를 목표로 진행된 본 연구에서는 용접기의 동특성분석 실험과 시뮬레이션을 통해 진동 크기 및 진동형을 조사하여 불안정의 주된 원인을 분석하였고 이를 바탕으로 설계 개선안을 설정하고 그 효과의 검증을 통해 진동의 크기를 억제하고 용접 정도를 높이기 위한 설계 개선안을 완성하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 대상인 레이저 용접기로 모터를 사용하여 정밀 용접을 진행하는 경우 (모터의 작동속도는 8.3, 12.5Hz[500, 750 rpm]) 구조물의 고유진동수(7.5, 9.0Hz)와 모터의 작동속도의 공진에 의하여 진동이 커지게 됨을 확인하였다.
- (2) 구조물의 진동 억제를 통한 용접 정밀도 개선을 위하여 강성을 보강하고 고유진동수가 작동속도의 1.3배 이상이 되어 공진이 회피되도록 설계 개선안을 도출하였다.
- (3) 설계 개선안을 적용한 결과 새로운 기계의 제작이 아닌 단순한 보강 설계만으로도 구조물의 주 작동속도[8.3, 12.5Hz] 및 전체 작동속도 영역[0~30Hz]에서의 진동을 각각 97%, 81%정도 억제할 수 있음을 확인하였다.
- (4) 본 연구의 결과를 활용하면 유사한 자동 용접장비의 안정화를 통한 용접 정도의 제

고는 물론 용접기 설계 및 제조 관련분야의 원천기술 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업에 의하여 연구된 논문으로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

기 호

X	진동의 크기 [m]
$x(t)$	진동 [m]
$\dot{x}(t)$	속도 [m/s]
$\ddot{x}(t)$	가속도 [m/s ²]
m	질량 [kg]
m_r	회전체 질량 [kg]
c	감쇠 [N · s/m]
k	강성 [N/m]
e	편심 [m]
$f(t)$	외부 가진력 [N]
t	시간 [s]
ϕ	위상 [rad]
ω	작동진동수 [Hz]
ω_n	고유진동수 [Hz]
ζ	감쇠비

참 고 문 헌

- 1) Fertis D. G. : Mechanical and Structural Vibration, John Wiley & sons, Inc., New York, pp.197-241, (1995)
- 2) D. J. Ewins : Modal Testing, Brüel & Kjær, (1986)
- 3) R. B. Randall and B. Tech., B. A. : Frequency Analysis, Brüel & Kjær. (1977)
- 4) Kenneth G. McConnell : Vibration Testing, John Wiley & sons, Inc., New York, (1995)
- 5) Halvosen, W. G. and D. L. Brown, *Journal of Sound and Vibration*, Nov., 8, (1977)
- 6) Ro, S. H., Cho, H. J. and Choi, E. H., *Trans. of the KSME (A)*, 24, 8, 1978, (2000)
- 7) Cho, H. J. and Ro, S. H., *Trans. of the KSME (A)*, 23, 4, 697, (1999)

(접수:2010.08.03, 수정:2010.09.29, 게재확정:2010.11.24)