

티타늄 합금의 레이저 용접 공정 시 잔류 응력 저감 방안에 대한 연구

이 우 램* · 박 태 성** · 박 익 근**,*†

*한국국제대학교 기계자동차공학과

**서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

Study on a Residual Stress Reduce in Laser Welding Process using Ti6Al4V

Wooram Lee*, Taesung Park** and Ikkeun Park**,*†

*Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, International University of Korea, Jinju 52833, Korea

**Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 01811, Korea

†Corresponding author : ikpark@snut.ac.kr

(Received February 15, 2016 ; Revised March 28, 2016 ; Accepted August 8, 2016)

Abstract

The experimental study has been performed through residual stress using the Ti6Al4V, investigate the effect of laser shock peening on laser welding process residual stress of Ti6Al4V welds in a reduce safety weld zone. This research evaluated the effects of shock waves from laser shock peening with a pulsed Nd:YAG laser on Ti6Al4V welding specimens, through the analysis of the residual stress of the specimens. The residual stress could be formed by the depth of 1 mm if the proposed method of reducing the residual stress is performed in the optimal condition. The welded structures and products during the production process increase the mechanical property of repeated stress, which could be expected to extend the fatigue life of the structure.

Key Words : Laser welding process, Residual stress, Laser shock peening, Ti6Al4V

1. 서 론

최근 용접 기술의 발달로 인하여 기존의 조립 방법들이 용접으로 대체되는 경향이 있으며 이미 선진국에서는 연구와 수요가 빠르게 증가되고 있다¹⁻²⁾. 반면 국내의 경우 실용화하기에는 기술적 연구가 미비한 실정이다³⁻⁴⁾. 특히 해양 선박의 경우 가공성과 경제성 등으로 인해 용접 공정을 이용한 조립이 제조 분야의 주를 차지하며, 항공기, 자동차 및 구조물 등에도 용접 공정이 많이 사용되고 있다⁵⁻⁶⁾. 항공 산업 분야의 경우 높은 내부식성 및 우수한 피로 수명을 요구하는 티타늄 합금에 대한 수요가 높아지는 추세이다⁷⁻⁸⁾. 자동차 산업의 경우 최근 생산 공정에 사용되는 외장재는 경제성 때문에 주로 일반 탄소강이 많이 사용되고 있으나, 티타늄 합금의 경우 실온에서의 비피로강도(피로강도/밀도)가

월등히 높고, 우수하기 때문에 고가임에도 불구하고 반복적인 하중이 걸리는 자동차 부품에 경량화를 위하여 주목받아 오고 있다⁹⁾. 하지만, 용접 공정은 단시간에 높은 열을 인가하므로 용융 후 응고되는 과정에서 주조 결함 및 열적 변형에 의한 결함을 내포하게 된다. 이러한 결함들¹⁰⁾은 응력이 집중되어 초기 균열을 발생시키거나 피로 파괴를 초래하기도 한다¹¹⁾. 특히 용접 공정 시 국부적인 열원으로 인해 용접부 주위에서 열적 응력, 냉각 시 수축으로 인한 잔류 응력 및 기타 결함 등이 주요 문제로 제기되고 있다¹²⁾. 또한 취약한 열영향부 등에 기인된 결함 등이 피로 수명의 저하로 발생하는 균열에 의해 파단 등의 사고로 빈번히 보고되고 있다⁷⁻¹²⁾. 이와 같은 선행 보고를 통해 용접부에 기계적 성질 및 피로 강도 향상을 위한 대안으로 용접부 비드 형상의 개선 및 표면처리를 통한 압축 잔류 응력 도입 등이 적용될 수 있다¹³⁾.

용접 공정 후 표면 처리 기술은 용접부 비드 부분에 적용하여 압축 잔류 응력을 생성하여 기계적 특성을 효과적으로 향상시킬 수 있다. 대표적인 개선 방법으로는 Weld Toe Grinding¹⁴⁾, GTAW Dressing¹⁵⁾, 압축 잔류 응력 유도법¹⁶⁾ 및 피닝 기술¹⁷⁾을 대안으로 표면 처리 기법인 피닝 기술(쇼트, 레이저)이 사용되고 있다¹⁸⁾. 피닝 기술의 경우 공정 시간이 짧고 열에너지원이 불필요 하며, 전체적인 소성 변형과 미세 조직 변화를 상대적으로 발생시키지 않는 이점이 있다. 쇼트 피닝의 경우 쇼트볼을 고속의 공기 흐름으로 표면에 분사하면 소성 변형이 발생하며 항복 응력이 약 70-80 % 수준의 압축 잔류 응력을 유발하게 된다¹⁹⁻²¹⁾. 하지만 압축 잔류 응력의 크기가 제한적이며 정확한 위치의 조정이 불가능하다는 단점이 있다. 반면, 레이저 쇼크 피닝 공정의 경우 압축 잔류 응력이 국부적으로 높으며 정확한 표면 처리 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다²²⁻²³⁾.

이에 본 연구에서는 티타늄 합금(Ti6Al4V)을 이용해 레이저 용접 공정을 수행한 후 기계적 특성 개선 및 발생된 열적 응력의 완화를 위해 레이저 피닝 공정을 추가로 진행하였다. 레이저 피닝 공정은 선행 연구된 결과를 토대로 구속층은 투명 폴리카보네이트 필름을 이용한 건식 공정을 수행하였다. 최종적으로 제안된 공정이 잔류 응력 완화에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 레이저 피닝 충격파 압력 모델링

레이저 피닝 공정 시 압축 잔류 응력에 대한 효과를 수치적으로 예측하기 위해 레이저 피닝의 물리적 현상에 대한 가정과 단순화가 필요하다. 레이저 에너지를 흡수하는 흡수층과 어블레이션에 의한 플라즈마가 발생하여 그 충격파가 나올 때 재료 깊이 방향으로 효과적인 전달을 위한 구속층으로 나누어져 있다(Fig. 1).

이러한 공정 단계는 실제 수십 ns 부터 수십 μ s 까지의 시간 스케일을 가지고 있는 다중 물리 현상이 복합적으로 연결되어 있다. 이러한 과정들을 모델링하기 위해 실제 레이저 빔의 조사로부터 재료가 소성 변형이 될 때까지 전체를 해석하는 것은 비효율적이다. 이에 김주한 등²⁴⁾

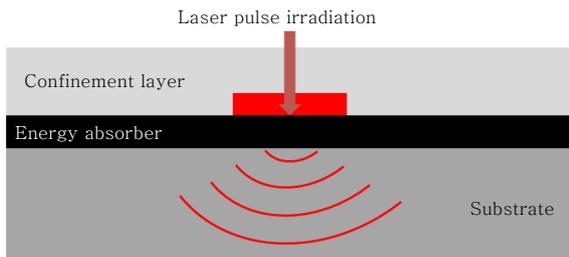


Fig. 1 Schematic of laser peening process

의 선행 연구에서는 레이저 빔의 특성에 따라 생성된 충격파가 금속 소재의 기계적 특성을 향상시킨다는 수치적 해석 모델을 제안 및 증명하였다. 또한 금속 소재에 기계적 특성 변화에 따른 매개 변수를 설정하였고, 구속층 변화에 따라 충격파를 극대화 시키는 해석 모델을 구현하였다.

선행 연구 결과 구속층의 임피던스 변화에 따른 시간에 대한 압력 분포 변화가 고려 사항이며 이를 적용하기 위해 구속층의 다양한 임피던스 값을 가정하였다. 이를 통해 Ti6Al4V 재료의 충격파에 의한 압력 분포는 물 2.3-3.8 GPa, 폴리머 필름 4.4-5.4 GPa 의 최대 순간 압력이 발생하는 것으로 보고되었다²⁵⁾. 실제 터빈 블레이드 등에 많이 사용되는 Ti6Al4V 는 강성 및 기타 기계적 특성 등이 높은 재료이다. 레이저 플라즈마에 의해 유도된 충격파는 재료 표면에서 소성 변형을 일으키며 이는 재료 표면으로부터 근접한 내부에 압축 잔류 응력을 생성할 수 있다. 이러한 외부 충격을 통한 재료 소성 변형 모델은 여러 가지 충격 모델이 보고되어 왔으며, 이러한 선행 연구 중 존슨쿡 소성 변형 모델(Johnson-Cook Model)²⁶⁾을 적용하여 재료 처리 해석을 수행해왔다. 선행 연구 결과 물, 폴리머 필름 기준 60-85 % 의 압축 잔류 응력의 상승을 보고하였다. 해석 결과와 선행 연구를 통해 피닝 기법별 실험을 수행한 결과를 Fig. 2 로 표현하였다. 동일한 공정 후 시험한 결과 표면을 기준으로 쇼트 피닝 기법은 약 -74 MPa 으로 충격에 의해 생성된 잔류 응력이 약 1.2 mm 정도까지 진전되었다. 레이저 피닝 공정은 물 구속층의 경우 약 -115 MPa, 폴리카보네이트 필름의 경우 약 -153 MPa 로 측정되었다. 레이저 쇼크 피닝 공정은 약 1.3 mm 부터 감소하기 시작하였다. 이는 레이저 쇼크의 영향이 약 1.3 mm 정도까지 작용한 것으로 판단된다.

따라서 레이저 쇼크 피닝 공정은 금속 재료 조직의 압축 잔류 응력을 향상시킨 것으로 평가되었다. 쇼트

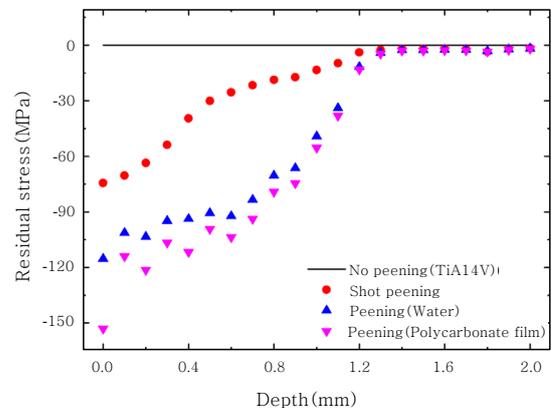


Fig. 2 Experimental results of residual stress test using laser peening process²⁵⁾

피닝 기법에 비해 레이저 쇼크 피닝 공정이 수치적으로 약 33 % 정도 압축 잔류 응력을 생성하였다.

정해용²⁷⁾ 은 이종 재료의 레이저 용접 공정 후 쇼트 피닝 공정을 추가로 수행하여 피로 수명을 극대화한 연구 보고가 있었다. 이 보고에 따르면 열영향부에서 피로 잔류 응력이 관찰되었으며, 쇼트 피닝 공정 후 열영향부의 인장 잔류 응력이 약 42 % 정도 저감되었다. 또한 레이저 용접 공정이 열에 의한 피로 잔류 응력에 쇼트 피닝이 미치는 영향을 검토한 결과 오버 피닝의 경우 피로 수명을 단축시키는 주원인으로 보고되었다. 이는 충격 하중이 증가할수록 압축 잔류 응력의 효과가 작용함을 실험적으로 검증한 것이다. 또한 일반적인 레이저 용접 공정의 경우 열영향부에서 균열이 시작하여 진전하였으나, 쇼트 피닝을 적용한 시험편은 압축 잔류 응력의 생성으로 인해 취약한 열영향부가 강화되어 시험편 모서리에서부터 균열이 시작하여 진전하였다고 보고하였다.

3. 실험 재료 및 방법

본 연구의 목적은 레이저 용접 공정으로 잔류 응력 및 기타 물리적 현상을 확인하는 것으로 사용된 금속 재료는 티타늄 합금인 Ti6Al4V 를 사용하였다. 사용된 재료의 화학적 조성(Table 1) 및 기계적 특성(Table 2)을 표현하였다. 시험편의 크기는 10 × 10 × 3 mm 이며, 용접 공정 시 버(burr)의 영향을 최소화하기 위해 용접 이음면을 정삭 가공하였다.

본 실험에서 사용된 레이저는 램프 여기 방식의 CW 파이버 레이저를 사용하였다. 본 레이저 장치의 주요 사양은 Table 3 로 정리하여 나타내었다. 최대 출력은 600 W 로 발전기의 최대 효율을 사용하기 위해 초점 거리, 빔 직경 등을 고려하여 파워 밀도를 600 W 의 경우 약 80 MW/cm² 정도이며, 레이저 출력을 400-600 W 까지 100 W 씩 상승시켜 가며 실험을 수행하였다. 또한 레이저 이송 속도는 5 mm/sec, 보호 가스는 Ar을 사용하여 20 ℓ/min 으로 시편 상부에 분사

Table 3 Specification of fiber laser

Type	Fiber laser
Function (Unit)	Spec.
Nominal output power (W)	600
Beam quality (mm-mrad)	≤ 1.1
Spot size (μm)	500
Power density (kW/cm ²)	About 300
Collimation lens (mm)	67
Focal length (mm)	163
Wave length (nm)	1070

하도록 고정하였다.

초점 위치는 재료 상부 표면에 일치하도록 하였고, 시험편의 위치를 제어한 후 프로그램을 이용하여 자동 용접하도록 구성하였다. 이를 통해 맞대기 용접 공정을 수행하였다. 또한, 선행 연구²⁸⁻³⁰⁾를 통해 Ar 을 보호 가스로 사용하였으며, 직경 4 mm 의 구리 노즐을 장착하여 초점 위치 바로 뒤에서 약 60° 의 각도로 레이저 빔을 따라가도록 설정하였다. 설정한 실험 장치에 대한 장비 및 공정에 대한 형상은 Fig. 3 로 표현하였다. 공정 전 이물질 및 불순물에 의한 불량 가능성을 최소화하기 위해 시험편 전체를 아세톤으로 세척하였다. 또한 이음부의 관리를 통해 갭의 크기를 0 mm 에 가깝도록 최대한 상태를 유지하였다.

용접 시험편에 레이저 피닝 공정을 통해 압축 잔류 응력을 생성하기 위해서는 표면에서의 레이저 스폿의 파워 밀도가 수 GW/cm² 이상이 필요하다. 또한 레이저 펄스의 반복률, 짧은 펄스폭 및 파장 등이 모두 주요 요소들이다. 본 실험에서는 플래시 램프 타입인 1064 nm 파장의 Nd:YAG 레이저 소스를 사용하였다. 레이저의 펄스폭은 24 ns 을 가지고 있으며 펄스당 에너지는 최대 500 mJ 이다. 레이저의 스폿의 크기는 약 400-450 μm 정도이며, 이에 대해 수 GW/cm² 의 펄스 압력을 발생하도록 공정 변수를 설정하였다. 레이저 빔의 집속을 위해 초점 거리 150 mm 인 집속 렌즈를 사용하였고, 전동 XY 이송 스테이지를 사용하였다. 용접

Table 1 Compositions of Ti6Al4V specimens (wt%)

	C	Ni	Fe	Al	V	Ti
Ti6Al4V	0.01	0.01	0.04	6	4	Bal.

Table 2 Mechanical property of specimens

	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
Ti6Al4V	720	610	17

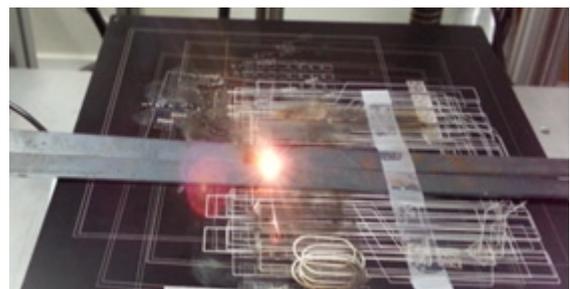


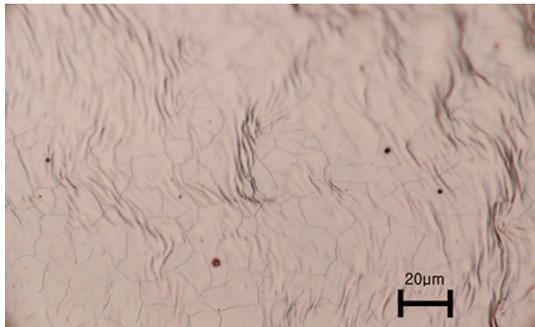
Fig. 3 Experimental setup (welding process)

시험편 제작 후 레이저 피닝 공정을 수행하였다. 레이저 피닝 공정 수행 시 시험편의 전처리 공정이 필요하다. 1) 아세톤을 이용하여 표면 세척, 2) 흡수층 제작은 용접 시험편 위에 약 50 μm 정도의 검정색 코팅제(black paint)를 증착, 3) 구속층 제작은 접착력을 가진 폴리 카보네이트 필름(polycarbonate film)을 사용하여 흡수층 위에 접착하였다. 이와 같이 공정을 수행한 후 미세 형상 및 응력 시험(홀드릴링 변형 게이지 기법)을 수행하였다.

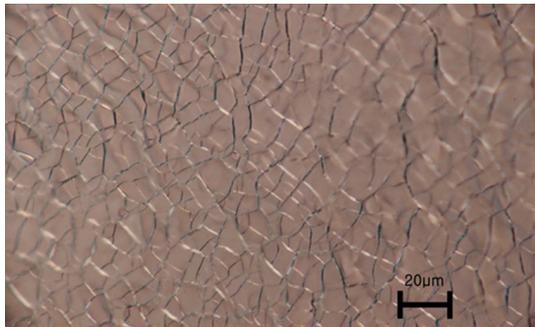
4. 결과 및 고찰

4.1 용융지 형상

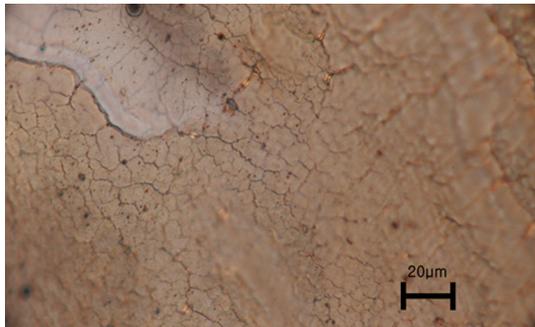
Ti6Al4V의 경우 선행 연구²⁸⁻³⁰⁾에서 보고된 것처럼 용융지 부분이 대부분 취성 파괴가 일어났다. 이에 레이



(a) 1 mm/sec



(b) 0.5 mm/sec



(c) 0.1 mm/sec

Fig. 4 Surface shape Ti6Al4V using laser peening

저 피닝 공정은 펄스 레이저를 이용하여 반복률 10 Hz로 고정 후 레이저 이송 속도만을 변수로 선행 실험을 진행하였다. Fig. 4은 레이저 이송 속도에 따른 미세 형상이다(×1,000). (a)의 경우 이송 속도가 상대적으로 빨라 표면에 대한 조직의 미세화는 이루어지지 않았다. 이는 단조 효과가 발생하지 않은 것으로 판단된다. (b)의 경우 조직이 미세화되는 효과를 관찰할 수 있었다. (c)의 경우 충격파에 의해 소재가 미세하게 손상되는 것을 관찰하였다. 또한 배율 ×1,000에서 관찰한 결과 균열로 보이는 현상이 발생되었으며, 용접부 및 비드에 과도한 피닝이 적용될 경우 미세 균열을 유발시킬 것으로 판단된다.

표면이 손상될 경우 피로 강도 면에서 취약하고 이와 같은 균열을 방지하기 위한 대책이 필요할 것으로 판단된다. 이에 레이저 이송 속도 0.5 mm/sec로 고정 후 피닝 공정을 수행하였다.

Fig. 5은 용접 비드 위에 피닝 공정을 한 결과 균열이 발생된 것을 관찰하였다. 이는 레이저 용접 공정 후 비드가 취화된 상태에서 충격파가 생성된 것이므로, 판단으로 진전되는 큰 균열이 발생하였다. 이와 같은 현상으로 인해 레이저 피닝 공정은 시험편의 하부부터 진행 후 상부를 수행하였다.

Fig. 6는 Ti6Al4V의 매크로 단면에 대한 형상이다. 용접 공정 중 시험편 간극이 발생하여 형상이 불규

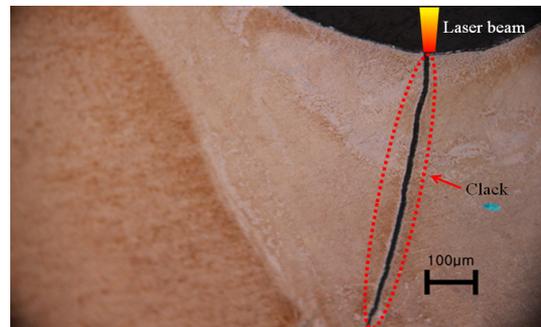


Fig. 5 Crack growth on front surface by laser peening



Fig. 6 Macro sections using laser peening process (Ti6Al4V)

칙하게 관찰된 것으로 판단된다. 이는 시험편 사이에 간극이 조금이라도 있으면 용접 공정 시 플라즈마가 간극에 따라 미세하게 흔들리는 현상이 발생하여 용접 비드가 건전하기 못하게 된다. 또한 기타 용접 기법(SMAW, GTAW, GMAW 등)³¹⁻³²⁾ 열원에 비해 레이저 스폿의 크기가 상대적으로 작으므로 간극으로 스폿이 빠져 용접이 정확히 이루어지지 않는 현상이 발생한다. 이는 단차의 경우에도 일부분만 용융되고 일부분은 모재가 용융되지 않고 그대로 남아있을 수 있기 때문에 가능한 단차가 생기지 않도록 모재를 잘 고정하여야 한다. 그러나 아무리 지그를 이용해 주의하여도 경우에 따라서 상대적으로 간극 및 단차가 발생할 수 있으므로 이와 같은 현상이 발생한 것으로 판단된다.

덧붙여, 이처럼 티타늄 합금의 경우 고순도 일 때는 연성을 띠지만, 불순물이 혼합될 경우 취성을 유발한다. 또한 탄소, 질소 및 산소는 0.1-0.2 %의 소량에서도 열화될 가능성이 높고, 온도와 합금 원소 첨가에 의해 동소 변화가 일어나는 재질이다. 입열량을 제어하지 못할 경우 공정 중에 동소 변화로 인하여 건전한 용접부를 얻기가 어렵다. 따라서 상변태가 일어나지 않은 범위 내에서 공정을 수행해야 한다³²⁾.

강덕수 등³³⁾의 연구에서는 상변태 온도(약 1160 K)에 따라 공정 중 상변태의 가능성이 있으므로 공정 조건 최적화를 통해 공정 온도의 제어가 필수적이라고 보고하였다. 또한 최적화된 조건에서 공정이 수행될 모재와 동등한 수준의 기계적 특성을 나타낼 수 있다.

4.2 잔류 응력 분포

응력을 실험적으로 측정하기 위해 홀드릴링 변형 게이지법을 이용하였다. 응력 측정의 결과에 대한 정밀도를 높이기 위해 표면을 기준으로 깊이 방향으로 측정하였으며, 1 mm 간격으로 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다. 또한 측정 위치 당 각각 10 개의 스트레인 게이지를 부착하여 평균을 낸 응력 수치 분포를 그래프화 하였다(Fig. 7). 티타늄 합금의 경우 용접 잔류 응력의 크기는 상대적으로 선행 연구³²⁻³³⁾에 비해 상대적으로 높게 측정되었다. 또한 열영향부의 잔류 응력 분포 경향을 보면 용접 시단부와 종단부의 미소 영역에서 상대적으로 크게 측정되었으며, 그 외의 영역에서는 일정하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 분석 결과로 레이저 용접 공정은 일정 부분을 제외하고는 동일한 열적 영향을 받는 것으로 판단된다. 이는 열영향부 근방에서 길이 방향의 잔류 응력이 폭 방향의 잔류 응력에 비해 높게 나타났다. 이는 폭 방향의 경우가 길이 방향의 경우에 비해 용접 입열의 냉각 속도가 빠르기 때문이다. 응력

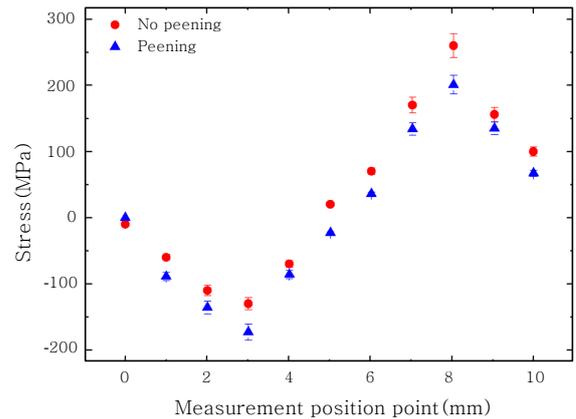


Fig. 7 Experiment result of the stress distribution of Ti6Al4V

수치가 최대인 지점은 열영향부 및 그 주위(8 mm)임을 알 수 있다.

이와 같은 현상은 다음과 같이 요약할 수 있다. 1) 시험편 자체를 구속하는 지그를 사용할 경우 용접부 및 열영향부 부근에서 인장 잔류 응력이 높게 형성될 것임. 2) 외적 구속을 할 경우 용접부에 입열량이 높아지고 열팽창 및 냉각 시의 수축 등에 의해 국부적인 굽힘이나 뒤틀림 등의 열적 소성 변형을 발생하기 때문임. 이와 같은 외적 구속에 따라 3) 용접부는 모재의 항복 강도에 가까운 높은 잔류 응력이 존재하여 파괴 및 피로 강도를 크게 저하시키며 균열 진전을 촉진 시킬 수 있음.

이와 같이 요약된 가정을 토대로 레이저 피닝 공정을 추가하였을 때, 예측된 압축 잔류 응력에 비해 상대적으로 수치가 낮게 측정되었다. 예측된 응력의 상승 비율은 약 60-85 % 이지만, 실제 용접부 실험 결과는 인장 응력이 약 25 % 저감 효과를 보였다.

5. 결 론

선행 연구와 동일한 조건으로 레이저 용접 공정을 진행한 후 추가적으로 레이저 피닝 공정을 수행하였다. 레이저 피닝 공정에 대한 충격과 압력 모델링을 통해 최종적으로 제안된 공정의 매크로 단면 및 잔류 응력 등 시험을 통해 기계적 특성 향상에 미치는 영향을 규명하였다. 이와 같은 공정을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 레이저 피닝 공정 시 구속층에 의해 초기 충격과 압력의 크기가 증가하게 되면 재료의 응력도 그 크기가 증감함을 알 수 있다.

2) Ti6Al4V의 경우 예측된 응력의 상승 수치는 약 60-85 % 이지만, 응력이 없는 상태일 경우 약 33 %, 실제 용접부 실험 결과에서는 약 25 % 인장 응력 저감

효과를 얻었다.

3) 덧붙여, 본 논문에서 제시한 응력 저감 방법은 최적 조건하에서 실시될 경우 용접 구조물 및 제품 제작 공정 시 기계적 특성을 증가시키고 반복 하중을 받는 구조물의 수명 연장에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다[2016-0860].

References

1. J. Lee, K. Asim and J. Pan, Modeling of Failure Mode of Laser Welds in Lap-shear Specimens of HSLA Steel Sheets, *Engineering and Fracture Mechanics*, 78 (2011), 374-396 (in Korean)
2. R. Shatma, P. Molian and F. Peters, Geometric Variability and Surface Finish of Weld Zones in Yb:YAG Laser Welded Advanced High Strength Steels, *Journal of Manufacturing Processes*, 12 (2010), 78-84
3. Min-Ho Park, Ill-Soo Kim, Jong-Pyo Lee, Byeong-Ju Jin, Do-Hyeong Kim, In-Ju Kim and Ji-Sun Kim, A Study on HAZ Softening Characteristics of Fiber Laser Weldment for High-Strength Steel, *J. of Welding and Joining*, 33 (6) (2015) 27-35 (in Korean)
4. Chang-Je Lee and Jong-Do Kim, A Study on Correlation between the Induced Plasma and Emission Signals for In-process Monitoring in Stainless Steel Welding of Fiber Laser (I), *J. of Welding and Joining*, 32 (6) (2014) 64-69 (in Korean)
5. Chang-Je Lee and Jong-Do Kim, A Study on Correlation between the Induced Plasma and Emission Signals for In-process Monitoring in Stainless Steel Welding of Fiber Laser (II), *J. of Welding and Joining*, 32 (6) (2014) 70-74 (in Korean)
6. Changmin Lee, Hyungkwon Park and Changhee Lee, Crack Susceptibility of Laser Cladding Process with Co-Based Metal Matrix Composite Powders, *Journal of Welding and Joining*, 32 (6) (2014) 41-46 (in Korean)
7. Keang-Hyeon Lee, Seong-Wong Choi and Chung-Yun Kang, Effects of laser power on hardness and microstructure of the surface melting hardened SKD61 hot die steel using Yb:YAG disk laser, *J. of Welding and Joining*, 33 (3) (2015) 54-61 (in Korean)
8. Jong-Do Kim, Gi-Hoon Myung, Moo-Keun Song, Jae-Hwan Oh and Jeong Suh, The characteristics of bead welding on steel with process parameter during the laser-arc hybrid welding (I), *J. of Welding and Joining*, 33 (2) (2015) 85-90 (in Korean)
9. Jong-Do Kim, Gi-Hoon Myung and In-Duck Park, The characteristics of bead welding on steel with process parameter during the laser-arc hybrid welding (II), *J. of Welding and Joining*, 33 (2) (2015) 91-96 (in Korean)
10. Young-Nam Ahn and Cheolhee Kim, The Effect of Shielding Gas Composition on High Power Laser Welding Characteristics, *J. of Welding and Joining*, 33 (4) (2015) 17-23 (in Korean)
11. Ueda Y. and M. G. Yuan, Prediction of residual stress in tand I-joints using inherent strain-A predicting method of welding residual stress using source of residual stress (Report 3), *J. of the Japan welding society*, 9 (3) (1991) 337-343
12. J. S. Kim, J. H. Kim, H. Y. Oh, C. Y. Kim, Y. J. Lee, K. S. and T. K. Song, Welding residual stress distributions for dissimilar metal nozzle butt welds in pressurized water reactors, *The Korean society of mechanical engineers A*, 36 (2) (2012) 137-148
13. J. Wareing, Fatigue crack growth in a type 316 stainless steel at elevated temperature, *Metallurgical Transaction*, 6A (1975) 1367-1377
14. I. Kim, Y. Jung and D. Lee, Improving fatigue strength of weld joints by blast cleaning in painting steel bridge, *Journal of the Korean society of steel construction*, 23 (3) (2011) 137-146 (in Korean)
15. C. Lee, M. Park and C. Chang, The study about the fatigue strength improvement mechanism by the processing of fillet welded joint, *Journal of the Korean society of steel construction*, 11 (3) (1999) 319-327 (in Korean)
16. P. J. Hagensen, The effects of grinding and peening on the fatigue strength of welded T-joint, *International institute of welding (IIW) Document*, (1993) XIII-1510-93.
17. International institute of welding (IIW), Commissions XIII and XV, IIW recommendations on post weld improvement of steel and aluminum structures, *IIW Document*, (2001) XIII-1815-00
18. International institute of welding (IIW), Commissions XIII and XV, recommendations for fatigue design of welded joints and components, *IIW Document*, (2008) XIII-1823-07
19. Hua Wei Rong, Hyun Jun Lee, Hae Young Jung, Sum Chel Hur and Won Jo Park, A Study on the Shot-Peening Effect for Fatigue Life Improvement of Laser Welding Material, *The Korean Society of Ocean Engineers*, 24 (2) (2010) 57-61
20. Jeong Woo Han and Seung Ho Han, Research for Fatigue Life Extension Techniques in Weldments via Pneumatic Hammer Peening, *The Korean society of mechanical engineers A*, 33 (8) (2009) 842-848 (in Korean)
21. S. Y. Yang, S. D. Choi, J. M. Jun and B. C. Gong, Improving the residual stress characteristics of the metal surface by Nd:YAG laser shock peening, *Journal of the Korean society of manufacturing technology engineers*, 19 (4) (2001) 539-547 (in Korean)
22. C. A. Lavender, S. T. Hong, M. T. Smith, R. T. Johnson and D. Lahrman, The effect of laser shock peening on the life and failure mode of a cold piler die, *Journal of materials processing technology*, 204 (2008), 486-491 (in Korean)
23. C. S. Montross, T. Wei, L. Ye, G. Clark and Y. W. Mai, Laser

- shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys, A review, *International journal of fatigue*, 24 (10) (2002) 1021-1036
24. Wooram Lee and Joohan Kim, Modeling of a confinement effect in laser shock peening on titanium alloy, *Journal of the Korean society of manufacturing technology engineers*, 22 (4) (2013) 540-545 (in Korean)
 25. Wooram Lee, A study of dry laser shock peening process design using a polymer film, *KOREA SCIENCE & ART FORUM*, 22 (2015) 257-266 (in Korean)
 26. G. R. Johnson and W. H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering fracture mechanics*, 21 (1) (1985) 31-48
 27. Hae Young Jung, A study on the effects of shot peening to the fatigue life of laser welded materials, Ph. D, Thesis, *Gyeongsang national university, Jinju, Republic of Korea*, (2009) 130-131
 28. Jong-Do Kim, Myung-Sub Kwak and Chang-Soo Kim, A Study of Weldability for Pure Titanium by Nd:YAG Laser(I) -Weld Properties with Shield Conditions-, *Journal of KWJS*, 27 (5) (2009) 55-61 (in Korean)
 29. Jong-Do Kim, Myung-Sub Kwak, Moo-Keun Song and Seung-Ha Park, A Study of Weldability for Pure Titanium by Nd:YAG(II) -Welding Properties of Butt Welding-, *Journal of KWJS*, 27 (6) (2009) 68-73 (in Korean)
 30. Jong-Do Kim, Byung-Lea Kil, Myung-Sub Kwak and Moo-Keun Song, A Study of Weldability for Pure Titanium by Nd:YAG(II) -Welding Properties of Edge Welding-, *Journal of KWJS*, 27 (6) (2009) 74-79 (in Korean)
 31. Byoung-Hyun Yoon, Suk-Hwan Kim and Woogn-Seong Chang, Recent Trends of Welding Technology for Ti and Ti Alloys, *Journal of KWJS*, 25 (5) (2007) 22-28 (in Korean)
 32. Fujii Nobuyuki, Fukuhara Yoshimasa, Hinata Teruhiko and Yasuda Katsuhiko, Examination of Melting Characteristics of Pure Titanium and Welding Procedure conditions -Welding or Pure Titanium and Joint Performance (Report 1)-, *Journal of the Japan Welding Society*, 20 (1) (2002) 20-25
 33. Duck-Soo Kang and Kwang-Jin Lee, Recent R&D status on friction stir welding of Ti and its alloys, *J. of Welding and Joining*, 33 (2) (2015) 1-7 (in Korean)