



이종 폴리머 소재의 레이저 투과 용접 시 결함의 실험적 평가

최대철^a, 신기훈^{b*}, 한영구^b, 홍민철^b, 정성균^b, 정종설^c, 나기정^d, 유호훈^e

Experimental Evaluation of Defects in Laser-Transmission Welding of Heterogeneous Polymer Materials

Dae Cheol Choi^a, Ki-Hoon Shin^{b*}, Young Gu Han^b, Min Cheol Hong^b, Seong-Kyun Cheong^b, Jong-Seol Jeong^c, Ki Jung Na^d, Ho Hoon Ryu^e

^a Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology

^b Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

^c R&D Planning Team, DAEEUN INDUSTRIAL Company Limited

^d Production Department, ALI Company Limited

^e R&D Team, LABS

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 January 2021
Revised 3 March 2021
Accepted 10 March 2021

Keywords:

Laser transmission welding
Heterogeneous polymer
Defects
Weld width

ABSTRACT

In this study, the laser process parameters were determined at which surface and sectional defects begin to occur during the laser-transmission welding of two heterogeneous polymer materials. Specifically, laser-transmission welding of PMMA and PC/ABS with thicknesses of 2 mm each was conducted using a thulium laser with a wavelength and focusing diameter of 2 μm and 1 mm, respectively. The experimental results show that the laser power at the time of defect occurrence also increases proportionally as the laser scan speed increases, but the corresponding energy density decreases. In addition, the ratio of the welding width to the laser diameter at defect occurrence slightly decreases from 1.25 to 1.13 with increasing scan speed. Based on the experimental results, it is necessary to increase the laser scan speed and power simultaneously within the allowable range in terms of energy efficiency and production time during laser-transmission welding.

1. 서론

최근 자동차 산업에서 제품의 경량화를 위해 금속 소재를 플라스틱 소재로 대체하고자 하는 노력을 하고 있다. 고분자 화합물(polymer)은 금속 소재보다 낮은 가격, 우수한 광학적 특성, 가볍고 낮은 온도에서 성형이 쉬워 금속의 대체제로 각광 받고 있다^[1]. 폴리머는 종류에 따라 물성이 다양하기 때문에 소재의 성능을 최대한 효율 좋게 이용하기 위해서는 특정 물성이 필요한 부분에 적

절한 폴리머 소재를 이용하여 부품을 제작하는 것이 중요하다. 이러한 이유로 효율이 좋은 부품을 생산하기 위해서 이종의 폴리머를 접합하는 공정에 대한 연구가 여러 분야에서 진행되고 있다.

이종 폴리머의 접합은 부품 형태로 성형한 폴리머를 기계적으로 접합하는 형태^[2-5]나 에폭시 혹은 폴리우레탄 같은 접착제를 이용하여 제품을 접합하는 공정^[6-7], 진동 및 초음파를 이용한 용접 공정^[8-12], 레이저를 이용한 접합 공정 등이 알려져 있다. 이종 폴리머 소재의 접합 및 체결 기술을 선택하는 것은 생산 효율 및 안정성에

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6320

E-mail address: shinkh@seoultech.ac.kr (Ki-Hoon Shin).

영향을 미치므로 신중히 선택하여야 한다. 레이저를 이용한 접합 공정은 제어, 반복, 가공 정밀도에 있어 우수한 성능을 보이고 있으며 친환경적인 공정으로 많은 연구가 진행 중이다^[13-14].

Genna 등은 PC (polycarbonate)를 투과재로 CFRP (carbon fibre reinforced plastic)를 흡수재로 사용하여 레이저 투과 용접을 진행하였고, 레이저 공정 변수를 변화시킨 시편의 인장강도를 비교하였다. 이후 용접공정을 진행한 시편에 레이저로 표면 처리를 진행하여 레이저 용접을 진행한 시편과 용접부의 인장 강도를 실험을 통해서 비교하였고 각 변수가 인장강도에 미치는 영향을 비교하였다^[15].

Liu 등은 PE (polyethylene)을 투과재로 POM (polyoxymethylene)을 흡수재로 사용하여 레이저 투과 용접을 진행하였다. 일반 용접 시편을 용접부에 산소 플라즈마 처리한 시편과 비교하였다. 산소 플라즈마로 전 처리한 결과 표면에 균일한 나노 크기의 기포가 생성되었고, 이로 인해 변형된 표면 거칠기는 용접 공정 전 기계적인 맞물림을 통해 용접 공정에서의 효율 증가를 보였다^[16].

Xu 등은 산란 레이저 빔의 T-NPFD에 대한 수학적 모델링을 통해 열가소성 물질에서 레이저 광의 산란을 측정하였고 레이저 투과 용접에서 투과재의 두께, 유리 섬유 함량 및 결정도 수준에 따라 광산란에 미치는 영향을 실험을 통해 확인하여 두 결과를 비교하였고 반결정성의 투과재의 경우 두께 유리섬유 함량이 증가하면 산란광의 비율이 증가함을 보였다^[17].

Potente 등은 PMMA와 PC/ABS 투과 용접 공정에서 두 소재에 가하는 압력에 따라 용접 이음 강도가 증가함을 확인하였다. 특히 반결정, 열가소성의 폴리머의 경우 고압에서 공정을 진행하면 용접 시편의 인장강도를 증가시키는 것을 확인하였다^[18].

이와 같이 레이저 투과용접은 이중 폴리머뿐만 아니라 금속과 폴리머 그리고 복합재료까지 다양한 소재로 용접 강도뿐만 아니라 실험을 통한 효율 및 시뮬레이션에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

다양한 폴리머 중에서 무색으로 광학적 특성이 뛰어나며 유리보다 내후성 내충격성의 특징을 가지는 PMMA는 레이저 투과용접에서 투과재로 많이 사용하고 있다. 그리고 PC와 ABS (acrylonitrile butadiene styrene copolymer)의 혼합재로 ABS의 내열성과 내충격성의 장점과 PC보다 점도가 낮아 가공성능이 우수한 장점을 가지고 있는 PC/ABS는 자동차 업계에서 광범위하게 사용하고 있는 소재이다. 이 두 소재는 각각 상호 보완의 물성을 가지고 있어 두 소재의 물성을 유지하면서 접합이 가능하다면 이용 가치는 매우 커질 것이다.

본 연구에서는 PMMA를 투과재로 PC/ABS를 흡수재로 한 레이저 투과용접 공정을 구축하였다. PC/ABS 소재에서 흡수율이 높은 튠 레이저를 이용하여 흡수재의 효율을 높였으며, 양산에

최적화된 레이저의 공정 변수를 찾아내고자 하였다. 레이저의 에너지, 빔 스캔속도를 변화시키며 공정을 진행하고 각 변수가 소재에 미치는 영향을 용접부의 결합을 통해 확인하고자 한다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 본 공정에서 이용한 레이저 용접 장비의 개략도이다. 본 시스템에서 IPG photonics의 TLR-100-WC-Y12 모델의 1.94 μm 파장을 가지는 CW 튠 레이저(thulium laser)를 에너지원으로 사용하였다. 사용한 레이저는 가우시안 모드의 레이저 빔이고, 파워 출력은 ± 0.04 W의 오차를 가졌으며 편광이 없는 레이저를 사용하였다. 레이저 빔을 집속 렌즈를 이용하여 1 mm의 크기로 소재의 표면에 집속시켰다. 레이저 파워와 레이저 빔 스캔속도를 변화시켜 레이저 변수가 공정에 미치는 영향을 확인하였다. 투과재는 70 × 50 × 2 mm 크기의 LG MMA에서 생산한 PMMA를 사용하였고, 흡수재는 70 × 50 × 2 mm 크기의 LG 화학의 PC/ABS (HR5007AT) 소재를 사용하였다. 두 소재의 열물성은 Table 1에 나타내었다. 두 소재의 열팽창계수는 비슷하여 열을 이용한 이중 접합 공정에 유리하다. 투과재 및 흡수재는 지그를 통해서 밀착시키고 나사(bolt)를 이용하여 체결시켰다. 레이저 용접 공정 이후 용접부는 수압절단기를 이용하여 절단하고 단면의 연마 과정을 거쳤고 광학 현미경을 통해 형상을 관찰하였다.

레이저 투과 용접 공정은 흡수재의 레이저 흡수율이 중요하다. 그래서 투과재를 통과한 레이저의 흡수율을 측정해야할 필요가 있다. Tan 등의 연구에서 2000 nm의 파장 대역에서 PMMA는 70~80%의 투과율을 보인다고 설명하였다^[19]. 실제로 투과재 PMMA를 투과한 후 흡수재의 레이저 흡수율을 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 집속 렌즈로 집속된 레이저 빔의 에너지를 파워 미터로 측정된 초기 레이저 에너지 P_0 와 투과재에 투과시켜 측정

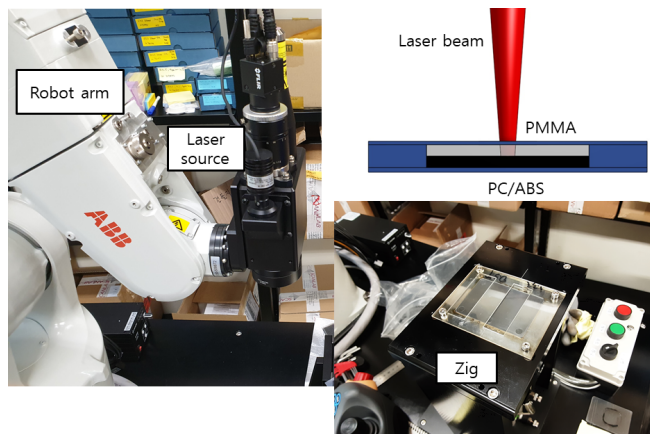


Fig. 1 Schematic of laser transmission welding device

Table 1 Thermal properties of PMMA and PC/ABS

	PMMA	PC/ABS
Density (g/cm ³)	1.18	1.15
Glass transition temperature (°C)	95 - 109	114 - 128
Melting point (°C)	160	220
Vaporization point (°C)	200	360
Specific heat capacity (J/kg·K)	1466	1348
Thermal conductivity (W/m·k)	0.18	0.51
Thermal expansion coefficient (K ⁻¹)	70 × 10 ⁻⁶	68.4 × 10 ⁻⁶

한 레이저 에너지를 비교하여 재료의 흡수율을 계산하였다. Fig. 2는 투과 전 레이저 파워와 PMMA 소재를 투과한 이후의 레이저 파워를 비교한 그래프이다. PMMA 층 통과 전 레이저 파워 15, 20, 25 W에 대해 통과 후 각각 11 (73.3%), 15 (75%), 19 W (76%)로 측정되었다. 에너지별로 약간의 오차는 있지만 거의 대부분 PMMA를 투과한 PC/ABS는 톨룸 레이저 파장에서 약 75%의 광 흡수율을 가지는 것을 확인하였다. 이전 연구에서 투과재의 광 투과율과 비교하면 비슷한 수치이다.

본 연구에서 레이저 투과 용접 공정에서 레이저의 공정 변수가 이종 폴리머의 용접 품질에 미치는 영향을 표면 및 단면의 결함을 통해 분석하고자 하였다. 레이저 파워(laser power), 레이저 빔의 이동 속도인 레이저의 스캔 속도(scan speed)를 변수로 설정하였고 Table 2에 변수의 수준을 나타내었다. 레이저 파워는 레이저에서 구현 가능한 최소 파워인 15 W, 스캔 속도는 최소 파워에서 폴리머에 영향을 주지 않는 3 mm/s와 로봇팔로 구현할 수 있는 최고 속도인 30 mm/s를 스캔 최고 속도로 설정하였다. 집속했을 때 레이저의 빔 지름은 약 1 mm로 고정하여 사용하였다. 공정 조건에 따라 이종소재에 조사되는 레이저 에너지 밀도가 달라지며 이는 다음의 식 (1)을 통해서 계산 할 수 있다.

$$E' = \frac{E}{A} = \frac{Pt}{dl} = \frac{P}{vd} \quad (1)$$

E' 는 레이저 에너지 밀도(J/mm²), P는 레이저 파워(W), $t=l/v$ 는 용접부를 스캔하는데 걸린 시간(sec), v 는 스캔 속도(mm/s), l 은 용접면의 길이(mm), d 는 레이저의 빔의 크기(mm)를 나타낸다. 레이저의 에너지 밀도는 용접부의 면적(A) 대비 레이저의 에너지(E)로 계산할 수 있다. 즉, 용접면에 가해지는 레이저 에너지는 CW 레이저의 파워(P)에 용접부를 스캔하는데 걸린 시간(t)을 곱해 구한다. 용접부의 면적(A)은 레이저 빔 지름(d)과 용접부의 길이(l)의 곱으로 계산한다. 이를 통해서 최종적으로 용접 시 용접부에 가해지는 레이저 에너지 밀도를 계산할 수 있다.

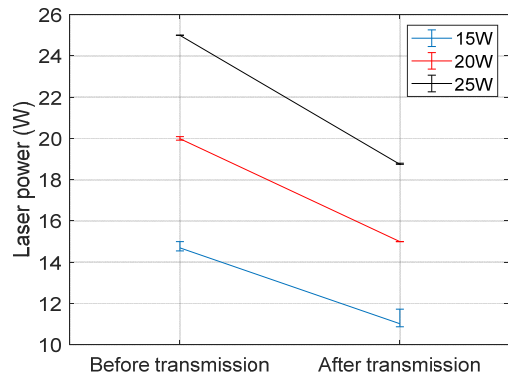


Fig. 2 Laser powers measured before and after passing through the PMMA layer

Table 2 Parameter of laser transmission welding

Parameter	Limit				
	15	20	25	30	35
Laser power (W)					
Scan speed (mm/s)	3		10		30

3. 실험결과 및 고찰

공정변수가 용접부의 결함에 미치는 영향을 분석하기 위해서 각 변수별 실험을 진행하였다. Fig. 3은 레이저 빔의 에너지를 조정하여 3 mm/s로 레이저 투과용접 공정을 진행한 결과의 현미경 사진이다. 레이저 에너지 15 W의 조건에서 레이저 용접부의 폭은 0.95 mm 정도였다. 단면의 경우 용접부에 열에 의한 변형으로 형상 변화가 일어나고 흡수재의 색이 변화한 것을 확인할 수 있었다. 투명한 PMMA와 흑색의 PC/ABS 소재가 레이저에 의해 녹아 변형이 일어나고 이후 소재가 식으면서 열팽창으로 인해 서로 소재에 침투한 것으로 보인다.

19 W의 조건에서 표면에 기공으로 보이는 결함이 최초로 발견되었다. 용접부의 폭은 1.25 mm였고, 단면에서 결함은 보이지 않았다. 표면에서 보이는 결함은 두께가 얇아 단면에서 확인이 힘든 것으로 보인다. 20 W의 조건에서는 표면의 용접 폭이 1.6 mm로 증가하였다. 에너지의 증가로 레이저에 영향을 받는 면적이 레이저의 파워에 비례하여 증가한다. 투과재 깊숙이 기공이 보였으며 단면에 거대한 기공이 발생하였다.

단면의 우측이 살짝 떠 있는 것을 확인할 수 있는데 이는 열팽창 시 생기는 부피 증가로 인해서 생긴 공간으로 판단된다. 이러한 용접부의 기공은 다른 용접부의 표면과 바닥면이 용융 및 팽창으로 인하여 면적이 증가하여 발생한 것으로 판단된다. Coutois 등의 연구에서는 레이저를 이용한 용접 공정에서 레이저가 지나간 뒤에 용접부의 기화된 부분이 날아간 이후 열 영향부에서 열팽창이 이루어지면서 용접부 하단에 기공이 발생하는 것으로 설명하였다^[20].

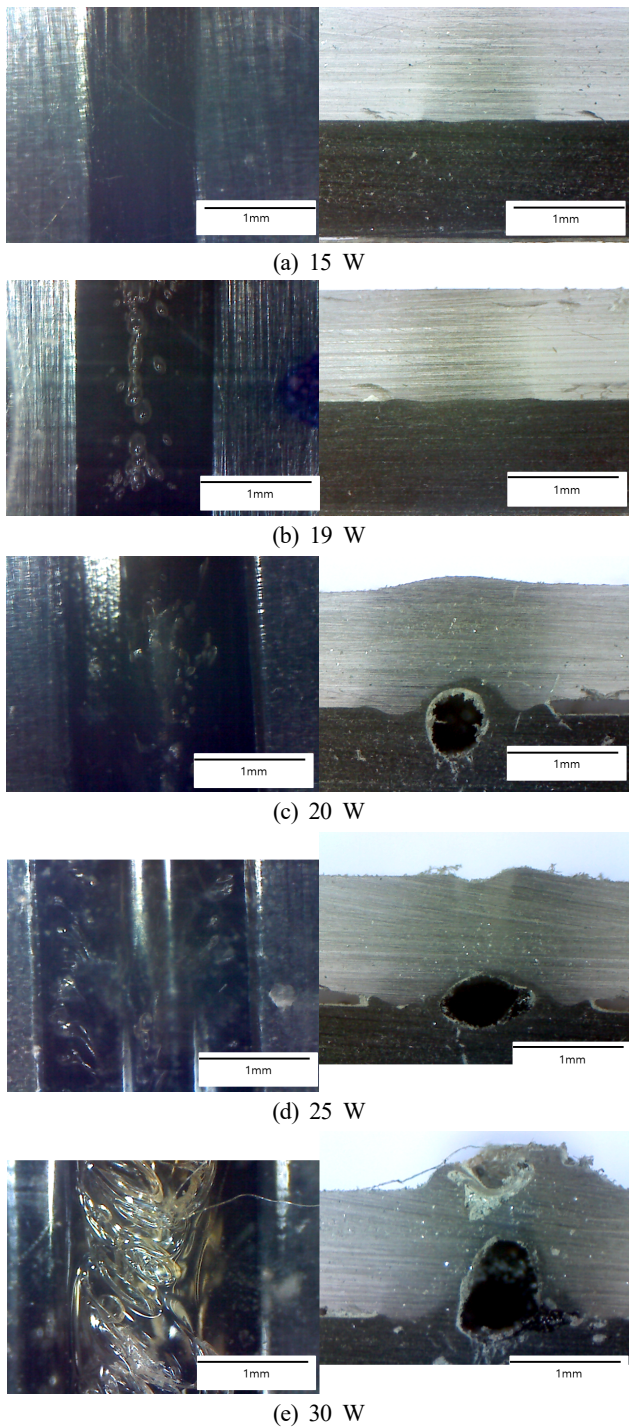


Fig. 3 Micrograph of weld surface and cross section at scan speed 3 mm/s and laser power

본 연구에서의 공정은 시물레이션과 같은 형상으로 진행되는 것처럼 보이나 투과재와 흡수재로 막혀있기 때문에 기화된 소재가 빠져나가는 양이 줄어들고 빠져나가지 못한 소재끼리 섞이고, 식으면서 단면 형상이 불규칙해지는 것으로 보인다. 에너지가 증가하면 기화된 소재의 양이 증가하고, 이전 조건보다 많은 양이 빠져나가며, 빈 공간을 공기가 채워 기공이 생기는 것으로 판단된다.

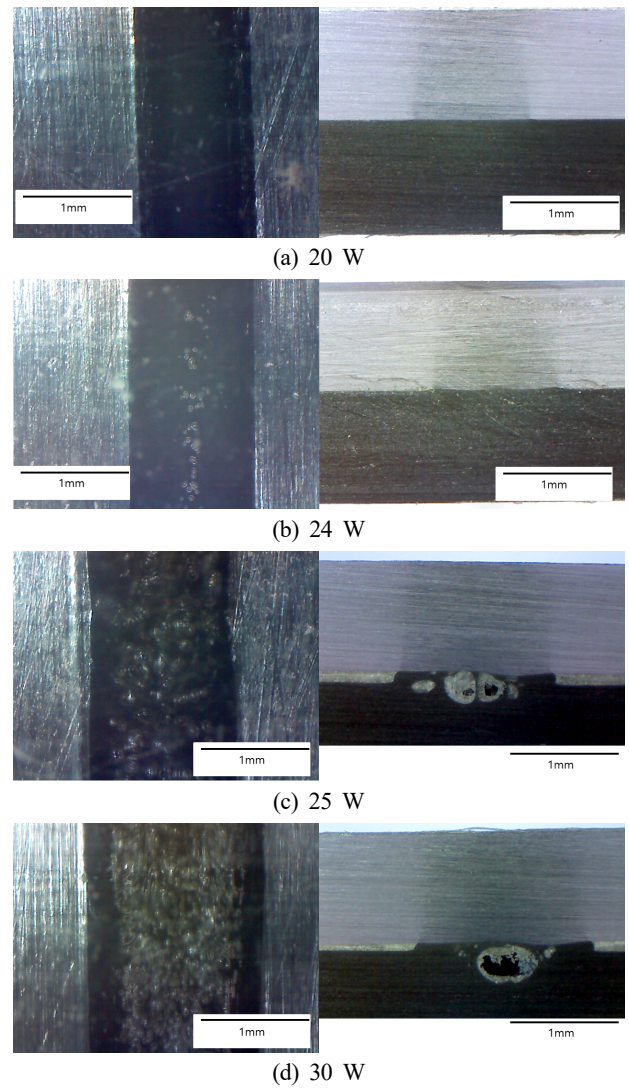


Fig. 4 Micrograph of weld surface and cross section at scan speed 10 mm/s and laser power

25 W의 에너지 조건에서 용접부의 폭이 2 mm로 증가하였다. 투과되지 못한 레이저 빔의 영향으로 투과재 상단에서 변형이 일어나는 것을 발견할 수 있었다. 30 W에서는 용접부의 폭이 2.23 mm로 넓어졌으며 투과재 표면의 변형이 보였고, 균열(crack)이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 단면에서도 기공의 크기가 커지고 투과재 표면의 큰 변형을 확인할 수 있었다. 스캔 속도 3 mm/s 조건에서 표면에 결함이 나타나는 에너지 밀도 조건은 식 (1)에 의해 19 W 조건에서 약 $6.33 J/mm^2$ 이며, 용접 폭은 1.25 mm이다.

Fig. 4는 스캔 속도를 10 mm/s로 증가시켜서 실험을 진행한 사진이다. 20 W 미만의 조건에서는 표면에서 용접부의 흔적을 확인할 수 없었다. 20 W의 경우는 용접선의 폭이 레이저 빔의 지름보다 10% 증가한 1.1 mm이었으며 표면 및 단면에는 결함을 찾을 수 없었고 투과재의 색이 변화한 것만 확인할 수 있었다. 24 W 조건에서 최초로 표면에서 확인할 수 있는 기공이 용접부의 몇몇 위

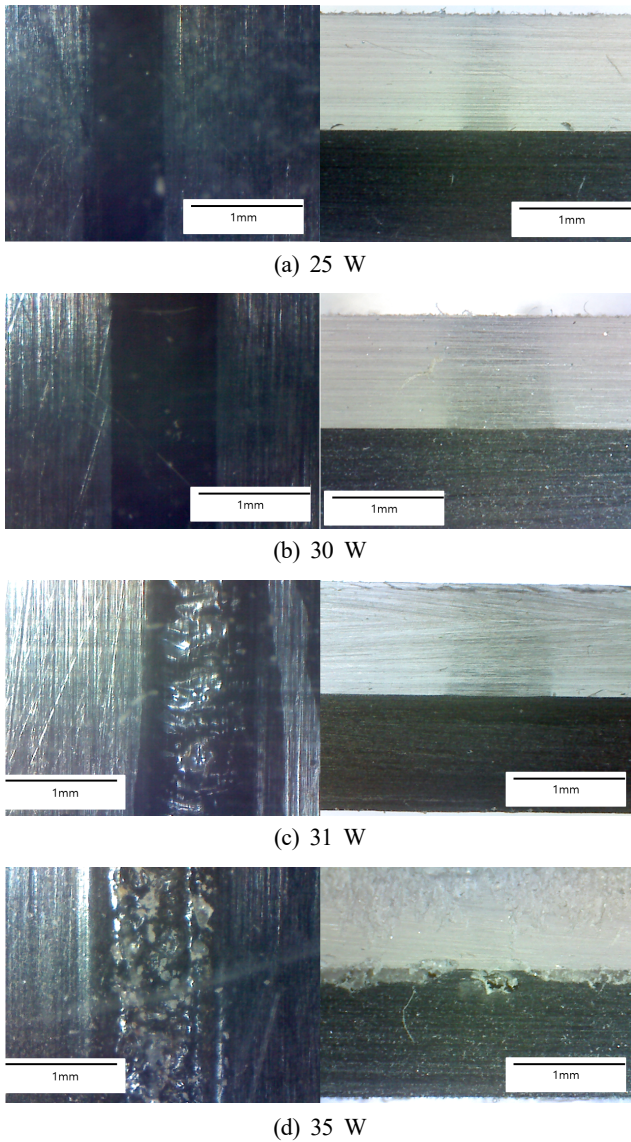


Fig. 5 Micrograph of weld surface and cross section at scan speed 30 mm/s and laser power

치에서 보였다. 용접부의 폭은 1.22 mm이었고, 단면에서는 이전의 에너지와 마찬가지로 기공의 확인이 어려웠다. 25 W 조건에서 표면의 용접부의 폭은 1.3 mm로 증가했고 표면에서 본 용접부에 균열, 기공으로 보이는 결함의 양이 증가했으며 단면에서는 여러 개의 기공을 확인할 수 있었다. 30 W 조건에서 용접부의 폭이 1.63 mm로 증가하였고 표면에서 본 용접부의 결함이 더 증가한 것을 확인할 수 있었다. 단면에서 기공이 존재하는 것을 확인했으며 용접부의 팽창으로 인해 흡수재의 용접부가 부풀어 오른 것을 확인하였다. 스캔 속도 10 mm/s 조건에서 표면에 결함이 나타나는 에너지 밀도는 24 W에서 약 $2.4 J/mm^2$ 이며 용접 폭은 1.22 mm이다.

Fig. 5는 공정 속도 30 mm/s로 실험을 진행한 용접부의 사진이

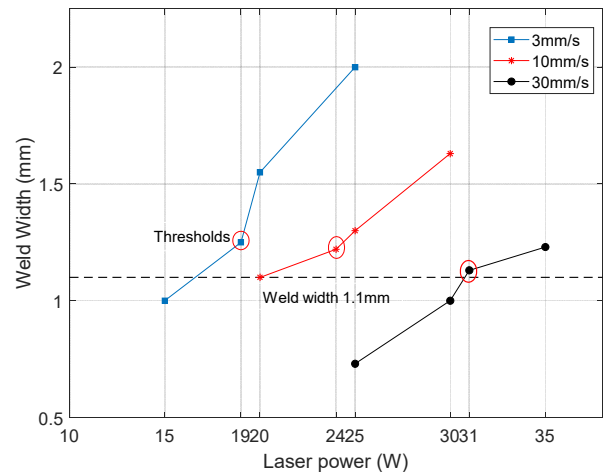


Fig. 6 Width of weld after laser transmission welding process

다. 20 W 이하에서는 스캔 속도에 비해 레이저 파워가 적어서 용접이 제대로 되지 않아 용접부의 표면 용접선이 보이지 않았다. 25 W 조건에서 용접부의 폭이 0.73 mm로 가장 작은 용접 폭을 보였다. 표면 및 단면에 결함이 보이지 않았으며 단면의 용접부에서 변형은 확인할 수 없었으나 투과재의 색이 변한 것을 확인하였다. 30 W 조건에서 용접부의 폭이 약 1 mm로 증가하였고, 단면에서 투과재와 흡수재의 결합 면이 변화한 것을 관찰할 수 있었다. 31 W 조건에서 용접부의 폭이 1.13 mm로 약간 증가하였다. 표면 결함이 최초로 확인되었으나, 단면에서는 결함을 확인할 수 없었다. 35 W 조건에서 용접부의 폭은 1.23 mm 이었으며 표면에서 결함이 확연히 증가하였고, 단면에서의 기공 및 팽창으로 인한 용접부 돌출 현상을 확인할 수 있었다. 30 mm/s 조건에서 결함이 확인 가능한 에너지 밀도는 31 W에서 약 $1.033 J/mm^2$ 이며, 용접 폭은 1.13 mm이다.

각 스캔 속도 조건에서 용접 폭을 정리하면 Fig. 6과 같이, 각 레이저 스캔속도에서 레이저 파워에 비례하여 용접 폭이 증가함을 확인할 수 있다. 레이저 스캔속도가 증가할수록 표면 결함이 발생하는 레이저 파워(19→24→31 W)는 증가하며, 용접 폭은 측정 오차 범위 내에서 미세하게 감소함(1.25→1.22→1.13 mm)을 확인할 수 있다.

즉, 스캔속도가 빠르면 레이저 에너지가 전달되는 시간이 짧아지므로 충분한 에너지를 전달하기 위해서는 레이저의 파워 조건이 높아져야한다.

특이한 점은 표면 결함이 발생하는 레이저 에너지 밀도(E'')는 Fig. 7과 같이 각 스캔속도 별로 일정한 경향이 아니라 급격히 감소($6.33 \rightarrow 2.4 \rightarrow 1.03 J/mm^2$)한다는 것이다.

레이저 투과율($\eta = 0.75$)를 고려하면, 실제 레이저 흡수층에서의 레이저 에너지 밀도는 아래 식 (2)로 계산할 수 있다. 식 (2)의

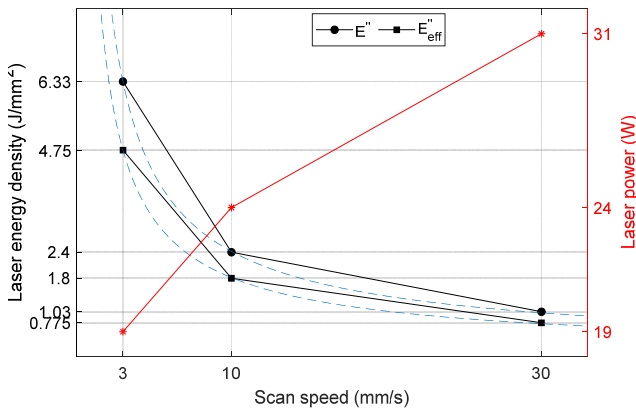


Fig. 7 Laser energy density and laser power when defects start to occur

E''_{eff} 는 PC/ABS 흡수층에서 반사, 산란, 굴절, 투과되는 레이저 에너지도 포함된 값으로 단순히 PC/ABS 층에 도달하는 레이저 에너지 밀도를 의미한다.

$$E''_{eff} = E''\eta = \frac{P\eta}{vd} \quad (2)$$

각 레이저 스캔속도 별로 표면 결함이 발생할 때, 흡수층으로 전달되는 유효 레이저 에너지 밀도(E''_{eff})를 계산하면, Fig. 7과 같이 4.75 → 1.8 → 0.775 J/mm² 역시 감소한다. 즉, 과도 열전달 (transient heat transfer) 측면에서 소재의 용접부로 동일한 에너지를 전달하더라도 레이저 파워를 증가시켜 짧은 시간에 전달하면, 소재 국부영역의 온도를 용융점 이상으로 보다 빠르게 상승시킬 수 있기 때문에 판단된다.

자동차 부품의 투과 용접에서는 접합강도 및 알코올 기밀성 등이 중요한 요소이다. 본 연구에서는 알코올 기밀성에 초점을 맞추어 기밀성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 기공 및 균열과 같은 결함이라고 판단하여 연구를 수행하였다. 빛 투과영역에서만 변색이 없으면 되므로, PMMA 층에서 변색을 수반하는 일부 물성변화는 자동차 부품의 실질적인 기능에는 별로 영향이 없을 것으로 판단된다. 용접 폭은 결함이 발생하는 시점에서의 용접 변수를 정량화하기 좋은 요소로 판단하여 레이저 빔의 1.1배를 정량적인 최적 조건으로 설정하였다.

각 레이저 스캔속도 별 최적의 용접조건을 용접 폭을 기준으로 레이저 직경의 1.1배 정도인 1.1 mm로 가정한다면, Fig. 8과 같이 최적조건에서의 레이저 에너지 밀도(레이저 파워)는 5.67 (17 W) → 2 (20 W) → 1.026 (30.77 W) J/mm²로 역시 감소함을 알 수 있다. 레이저 투과율을 고려한 최적 용접조건에서의 유효 레이저 밀도는 4.25 → 1.5 → 0.770 J/mm²로 급격히 감소한다. 이러한 실험결과를 바탕으로 생산성과 에너지 효율(에너지 밀도)을 모

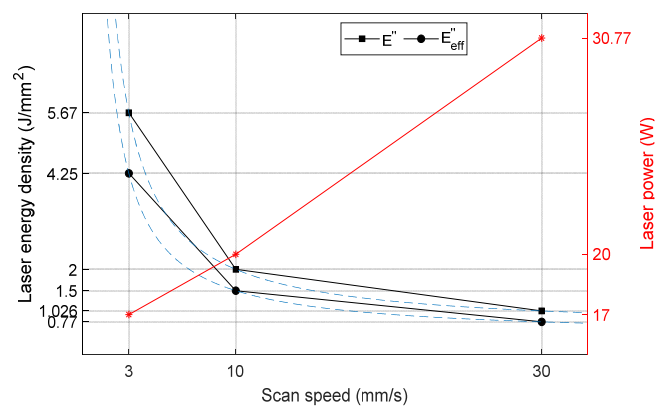


Fig. 8 Laser energy density and laser power at weld width = 1.1 mm

두 고려한다면, 레이저 파워와 레이저 스캔 속도를 표면 결함이 발생하지 않는 허용 범위 내에서 모두 증가시켜 작업하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 PMMA를 투과재로 PC/ABS를 흡수재로 사용하여 레이저 투과용접 공정을 실시하였으며, 레이저 공정 변수가 용접부의 표면 및 단면 결함에 미치는 영향을 형상 변화를 통해 확인하고 결함이 없는 에너지 밀도 조건을 찾고자 하였다. 레이저 에너지가 일정 수준에 도달하면 투과재 표면에서 제일 먼저 기공과 균열 같은 결함을 발견할 수 있었고, 파워가 더 올라갈수록 흡수재에서도 기공이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 레이저의 스캔 속도가 증가하면 표면 결함이 발생하는 레이저 파워 조건도 당연히 증가하나, 레이저 에너지 밀도는 일정하지 않고 급격하게 감소함을 확인하였다. PMMA 표면 및 PC/ABS 단면에서 결함이 발생하지 않으면서 용접 폭이 레이저 빔의 1.1배인 1.1 mm일 때를 본 연구에서의 정량적인 최적 조건으로 설정하였다. 용접 폭이 이보다 클 경우에는 단면 및 표면에 결함이 발생하며 폭이 이보다 적을 경우 용접 품질이 떨어지는 것으로 실험을 통해 확인하였다. 레이저 직경의 1.1배 정도의 용접 폭을 최적의 용접조건으로 가정할 경우 레이저 에너지 밀도도 스캔속도가 증가할수록 급격히 감소함을 확인할 수 있었다.

이러한 실험결과를 바탕으로, 실제 자동차의 헤드램프 부품 등의 레이저 투과 용접 시에, 생산성과 에너지 효율(에너지 밀도)을 모두 고려한다면, 레이저 파워와 레이저 스캔 속도를 결함이 발생하지 않는 허용 범위 내에서 모두 증가시켜 작업하는 것이 바람직하다. 향후 연구에서는 결함이 용접강도와 기밀시험에 미치는 영향을 확인할 계획이다.

후 기

본 연구는 2020년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업단지공단 지원(PIC19002R1) 및 2018년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2018R1D1A1B07048196)을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Lyu, M. Y., Choi, T. G., 2015, Research Trends in Polymer Materials for Use in Lightweight Vehicles, *Int. J. Pr. Eng. Man-GT.*, 16 213-220, <http://doi.org/10.1007/s12541-015-0029-x>.
- [2] Messler, R. W., 2000, Trends in Key Joining Technologies for the Twenty-first Century, *Assem. Autom.*, 20:2 118-128, <https://doi.org/10.1108/01445150010321733>.
- [3] Barnes, T. A., Pashby, I. R., 2000, Joining Techniques for Aluminium Spaceframes Used in Automobiles: Part II — Adhesive Bonding and Mechanical Fasteners, *J. Mater. Process. Technol.*, 99:1-3 72-79, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00361-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00361-1).
- [4] Galińska, A., Galiński, C., 2020, Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part II: Riveting, Clinching, Non-Adhesive Form-Locked Joints, Pin and Loop Joining, *Polymers*, 12:8 1-40, <https://doi.org/10.3390/polym12081681>.
- [5] Amancio-Filho, S. T., Santos, J. F., 2009, Joining of Polymers and Polymer-metal Hybrid Structures: Recent Developments and Trends, *Polym. Eng. Sci.*, 49:8 1461-1476, <https://doi.org/10.1002/pen.21424>.
- [6] Vinson, J. R., 1989, Adhesive Bonding of Polymer Composites, *Polym. Eng. Sci.*, 29:19 1325-1331, <https://doi.org/10.1002/pen.760291904>.
- [7] Matoss-Pérez, C. R., White, J. D., Wilker, J. J., 2012, Polymer Composition and Substrate Influences on the Adhesive Bonding of a Biomimetic, Cross-Linking Polymer, *J. Am. Chem. Soc.*, 134:22 9498-9505, <https://doi.org/10.1021/ja303369p>.
- [8] Patham, B., Foss, P. H., 2010, Thermoplastic Vibration Welding: Review of Process Phenomenology and Processing-structure-property Interrelationships, *Polym. Eng. Sci.*, 51:1 1-22, <https://doi.org/10.1002/pen.21784>.
- [9] Pal, K., Panwar, V., Friedrich, S., Gehde, M., 2015, An Investigation on Vibration Welding of Amorphous and Semicrystalline Polymers, *Mater. Manuf. Process.*, 31:3 372-378, <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1019111>.
- [10] Villegas, I. F., Bersee, H. E. N., 2010, Ultrasonic Welding of Advanced Thermoplastic Composites: An Investigation on Energy-directing Surfaces, *Adv. Polym. Technol.*, 29:2 112-121, <https://doi.org/10.1002/adv.20178>.
- [11] Balle, F., Wagner, G., Eifler, D., 2009, Ultrasonic Metal Welding of Aluminium Sheets to Carbon Fibre Reinforced Thermoplastic Composites, *Adv. Eng. Mater.*, 11:1-2 35-39, <https://doi.org/10.1002/adem.200800271>.
- [12] Villegas, I. F., Moser, L., Yousefpour, A., Mitschang, P., Bersee, H. E., 2012, Process and Performance Evaluation of Ultrasonic, Induction and Resistance Welding of Advanced Thermoplastic Composites, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 26:8 1007-1024, <https://doi.org/10.1177/0892705712456031>.
- [13] Choi, D. C., Kim, H. S., 2020, Performance Evaluation of Laser Shock Micro-patterning Process on Aluminum Surface with Various Process Parameters and Loading Schemes, *Opt. Lasers Eng.*, 124 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105799>.
- [14] Lee, S. G., Song, K. U., Choi, D. C., Noh, J. H., Kim, H. S., 2020, Laser Shock Surface Patterning of Steel and Aluminum Contact Surfaces and its Effect on Tribological Properties, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 29:4 288-295, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.4.288>.
- [15] Genna, S., Lambuase, F., Leone, C., 2018, Effect of Laser Cleaning in Laser Assisted Joining of CFRP and PC Sheets, *Compos. B. Eng.*, 145 206-214, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.03.032>.
- [16] Liu, H., Jiang, Y., Tan, W., Wang, X., 2017, Enhancement of the Laser Transmission Weldability between Polyethylene and Polyoxymethylene by Plasma Surface Treatment, *Materials*, 11:1 29, <https://doi.org/10.3390/ma11010029>.
- [17] Xu, X. F., Parkinson, A., Bates, P. J., Zak, G., 2015, Effect of Part Thickness, Glass Fiber and Crystallinity on Light Scattering During Laser Transmission Welding of Thermoplastics, *Opt. Laser Technol.*, 75 123-131, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.06.026>.
- [18] Potente, H., Schöppner, V., Bonefeld, D., Wilke, L., Hage, C., 2009, Experiments Regarding the Influence of Pressure Profiling on Laser-transmission Welding, *Weld. World*, 53 246-252, <https://doi.org/10.1007/BF03321136>.
- [19] Tan, W. K., Yokoi, A., Kawamura, G., Matsuda, A., Muto, H., 2019, PMMA-ITO Composite Formation via Electrostatic

Assembly Method for Infra-Red Filtering, *Nanomaterials*, 9:6 1-9, <http://doi.org/10.3390/nano9060886>.

- [20] Courtois, M., Carin, M., Masson, P., Gaied, S., Balabane, M., 2014, A Complete Model of Keyhole and Melt Pool Dynamics to Analyze Instabilities and Collapse During Laser Welding, *J. Laser Appl.*, 26:4 1-10, <https://doi.org/10.2351/1.4886835>.



Dae Cheol Choi

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest includes laser shock surface patterning and nanomaterials.
E-mail: cdc4662@seoultech.ac.kr



Ki-Hoon Shin

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is laser applications, FGM material and metal 3D printing
E-mail: shinkh@seoultech.ac.kr



Young Gu Han

B.Sc. student in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is laser applications.
E-mail: dudrn0105@naver.com



Min Cheol Hong

B.Sc. student in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is laser applications.
E-mail: hmc516@naver.com



Seong-Kyun Cheong

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is composite materials.
E-mail: skjung@seoultech.ac.kr



Jong-Seol Jeong

Senior researcher in DAEEUN INDUSTRIAL Co., Ltd. His research interest is Mechanical design and development.
E-mail: seolimeng@hanmail.net



Ki Jeong Na

Director in ALI Co., Ltd. His research interest is laser transmission welding process.
E-mail: dbs170@naver.com



Ho Hoon Ryu

Team manager in LABS. His research interest is laser applications.
E-mail: eric@labs.co.kr