

다중적층 소재 레이저용접 인자별 열영향 해석

최세훈*, 최해운**,#

*계명대학교 대학원 기계공학과, **계명대학교 기계공학전공

Parametric Analysis of Thermal Effects on Multi Layered Laser Welding

Se-Hoon Choi* and Hae-Woon Choi**,#

*Graduate School of Mechanical Engineering, Keimyung Univ.,

**Dept, of Mechanical Engineering Keimyung Univ.

(Received 5 December 2015; received in revised form 9 December 2015; accepted 11 December 2015)

ABSTRACT

Polymers, polymer compounds, are very moldable at low temperatures and have good strength against weight, and hence, are often used in the interior and exterior materials of cars. Owing to the increasing environmental problems, emission regulations have become stricter, which has increased the use of lightweight polymers as substitutes for metal materials. Therefore, as the use of polymer increases, extensive research is being conducted on the bonding technology of polymers, such as polyurethane and epoxy. However, the increased cost and environmental pollution by adhesives caused by the polymer manufacturing plant depend on the chemical composition or the manufacturer's mix ratio. To compensate for this issue, a laser beam is irradiated through a highly permeable polymer (PC) placed on top of an absorbent polymer (ABS) to transfer the laser output to the ABS polymer and fuse them at the interface. Moreover, enabling laser penetrating bonding by placing a stainless steel wire mesh between the two polymers can achieve improved bonding strength compared to conventional heterogeneous polymer bonding.

Key Words : Laser Welding(레이저용접), Polymer Joining(폴리머접합), Computer Simulation(컴퓨터 시뮬레이션), Dissimilar Material(이종재료)

1. 서 론

자동차 산업에서 연비향상 및 안전성을 이유로 차량의 경량화는 필수적이며, 이를 위한 다양한 소재개발 및 생산공정에 대한 기술개발이 진행 중이다. 차량 경량화와 가공의 편의성은 글로벌 완성차 업체들이

소재를 선정하는 중요한 기준이 되고 있으며, 폴리머의 경량성과 우수한 가공성으로 인해서 자동차 부품으로 많이 사용되고 있다. 폴리머는 종류에 따라 물성이 다양하여 소재의 효율을 최대한 좋게 하기 위해서 이종폴리머의 접합공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1].

폴리머 소재는 차량의 램프, 대시보드, 엔진커버, 헤드라이트 등 상대적으로 강도가 필요하지 않지만 복잡한 형상이 필요로 하는 부분에서 적용되어 사용

Corresponding Author : hwchoi@kmu.ac.kr
Tel: +82-53-580-5216, Fax: +82-53-580-6067

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

되고 있다. 이처럼 자동차 산업에서 폴리머 및 폴리머 조립품에 대한 수요가 늘고 있어서 폴리머 용접과 접합 기술 및 분석은 필수적으로 연구되어야 하는 기술이다.

대표적인 폴리머 소재로는 PC(Poly carbonate), ABS(Acrylonitrile butadiene-styrene) 등이 있는데^[2], 내구성 및 다양한 칼라 등에 대한 요구를 잘 충족하고 있다. 또한, 다양한 소재의 폴리머를 접합하여 완제품을 만드는데 이때 주로 사용하는 방법으로는 접착제 접합 방법이 있다. 주요 접착제로서는 에폭시, 폴리우레탄 또는 메타아크릴 베이스 소재가 많이 사용되고 있으며, 이종재료의 조합도 많이 시도되고 있다.

이러한 접착제를 이용한 접합법은 복잡한 형상에 대한 우수한 접합특성을 가지고 있으며, 비교적 낮은 작업 속련도가 요구되고 경제성이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 하지만, 제조사별로 화학조성, 혼합비 조성 등에 따라 매우 다양한 특성을 가지게 되고 환경오염 및 원가 부담이 문제점으로 떠오르고 있다.

기존 접착제를 이용한 접합의 한계를 극복하기 위해서 레이저를 이용한 접합기술이 많이 사용되고 있다. 레이저 접합은 높은 자동화, 고밀도 집속, 주변부 손상 최소화의 장점으로 인해서 고 신뢰도 제품생산에도 많이 사용되고 있다^[3-4].

폴리머 다중적층 용접 시 사용되는 레이저 접합방법은 레이저투과 접합방법이다. 특정 파장의 레이저에 대한 투과도가 다른 두 가지 물질을 접합시키는 방법으로 용접 품질이 우수하고 친환경적으로 용접이 어려운 형태에서도 정밀 용접이 가능하다. 일반적으로 투과성이 높은 폴리머(PC) 소재를 통과하여 흡수성이 높은 폴리머(ABS)에서 레이저 빔이 흡수되는 원리를 이용하고 있다. 레이저 빔이 투과성 높은 폴리머 계면에 조사시켜 레이저의 출력을 하단의 폴리머에 전달하여 접합시키면 계면에서 신뢰도가 높은 접합을 이룰 수 있다^[5-6].

다이오드 레이저는 반도체를 기반으로 한 컴팩트한 레이저이며 레이저프린터 등 일상용 레이저 뿐만 아니라 고출력 다이오드 레이저를 이용한 재료 가공 등 산업 분야까지 다양하게 사용되고 있다. 다이오드 레이저는 폴리머 접합 시 빠른 속도로 가공이 가능하며 일반기계로 가공하기 어려운 세라믹과 같은 물질의 가공을 쉽게 할 수 있는 장점이 있다.

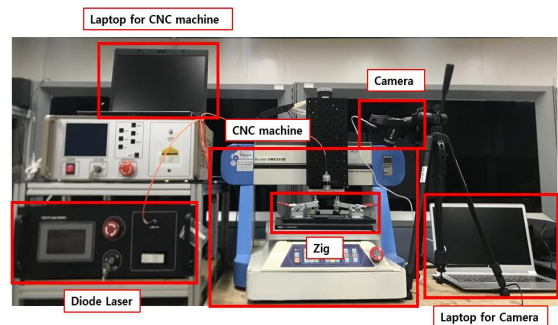
레이저를 이용한 폴리머 접합은 일반적으로 두 소재의 유리전이 온도이상에서 진행한다. 금속보다 발화점이 낮은 폴리머는 레이저빔의 급속 가열 및 냉각 특성으로 인해 용접부에 탄화 또는 기화가 일어날 수 있고 균열 및 내부 기공이 발생하여 용접강도 감소 등 용접 취성이 생기게 되어 용접 시간 동안 소재의 온도를 유리 전이온도 이상으로 제어하는 것이 중요하다. 따라서 용접 시간 등과 같은 다양한 용접변수에 따른 입열 형태를 최적화하기 위한 많은 연구가 진행되어야 한다^[7-8].

본 논문에서는 980nm 다이오드 레이저를 이용하여 다중적층 폴리머 용접 시 다양한 용접변수들에 의해 변하는 온도분포에 대한 연구 결과를 소개하고자 한다. 레이저 용접 시, 급격한 온도 변화로 인해 발생할 수 있는 재료의 손상을 최소화 하고 고 품질의 용접결과를 얻기 위한 온도 분포를 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 연구하였다. 시뮬레이션 결과의 검증을 위해 열화상 카메라를 이용하여 실제 용접온도를 측정하여 서로 비교 검증하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 장치

레이저 장치로 980nm의 파장을 가지는 다이오드 레이저를 이용하였다. 소재는 레이저빔에 비교적 투과성이 좋은 PC를 상부에 배치하고 흡수성이 좋은 ABS를 하부에 배치를 하고, 경계면에 Steel 소재의 Wire mesh를 추가하여 레이저의 출력을 흡수하여 접합하는 원리로 실험을 진행하였다.



(a)

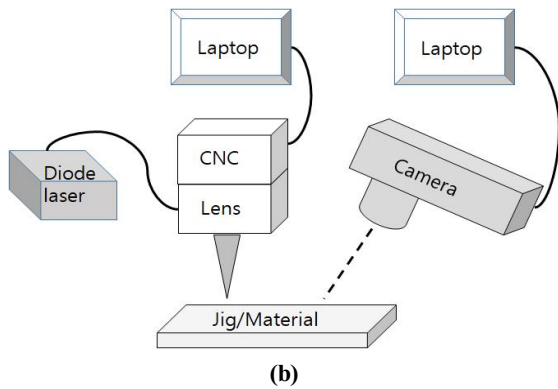


Fig. 1 (a) Experimental equipment for laser experiment
(b) Schematic diagram of the experiment

실험 장치는 Fig 1과 같이 구성하였으며, 실험에 사용된 다이오드 레이저는 파장 980nm, 최대출력 30Watt, 빔 전송 파이버 사이즈는 400 μ m 광섬유를 사용하였다. 빔 모드는 CW모드로 설정하였고 이동속도 및 방향을 제어하기 위해 소형 CNC machine의 헤드에 렌즈를 장착하였다.

열화상 카메라는 FLIR™사의 해상도 320 x 240, 최대 측정온도 250℃의 E8 모델을 사용하였고 Laptop을 사용하여 카메라 제어 및 데이터 습득을 진행하였다. 또한 용접 지그를 이용하여 다중적층 소재 고정 및 가압력이 최대한 효과적으로 가해질 수 있도록 레이저가 조사되는 부분을 제외한 부분의 틈을 최소화 하였다.

2.2 다중적층 소재 용접

실험소재는 접합용 재료로 PC(Poly carbonate)와 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)를 사용하였고, 빔 흡수 및 소재결합을 위해서 Steel 소재의 Wire mesh를 사용하였다. Fig. 2(a)와 같이 레이저 빔에 대한 흡수성이 뛰어난 ABS를 하단에 위치시키고 투과성이 좋은 PC를 상단, 그 사이에 Wire mesh를 두어 다중적층 소재 용접을 진행하였다. 실험용 시편으로 50mm x 100mm x 1mm의 폴리머를 제단하였고 Wire mesh는 10mm x 100mm x 0.1mm로 제단하여 사용하였다.

투과율 실험에서 PC는 86.8%, ABS는 0%의 투과율 값을 얻었고, 이 값으로 시뮬레이션에 필요한 파라미터로 사용되었다.

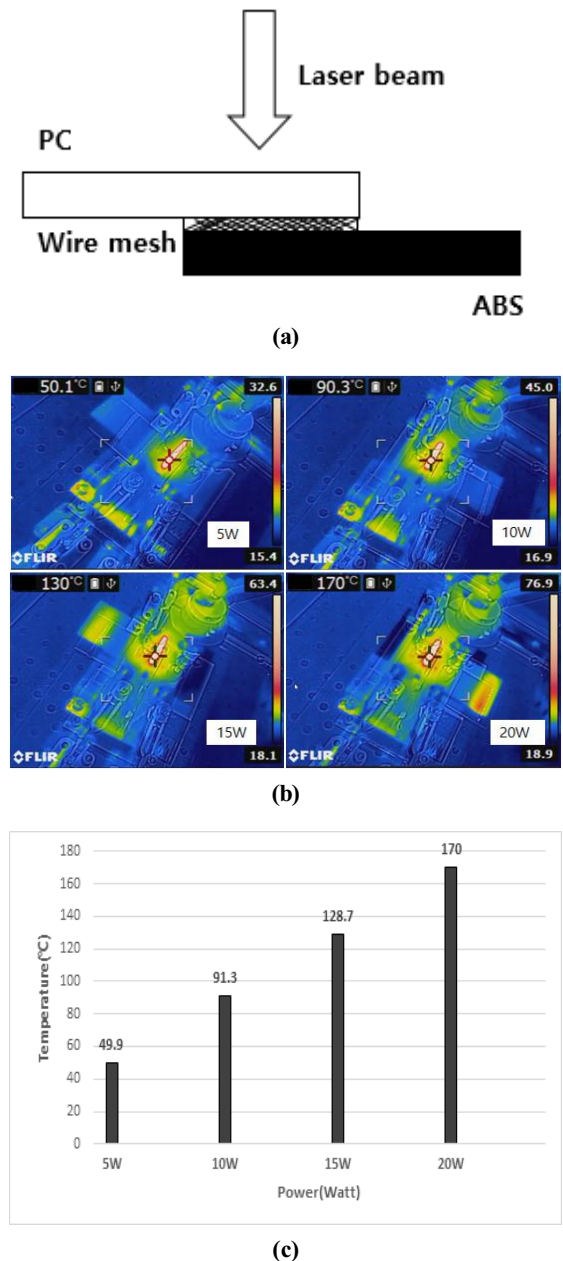


Fig. 2 (a) Experimental type diagram (b) Temperature measurement (c) Measurement results

장치 셋팅 후 980nm 영역의 단일파장을 이용하여 100mm/min의 속도로 시편을 이송하면서 온도분포를 열화상 카메라로 측정하였다. 출력은 5W~20W의

Table 1 Material properties of Acrylic

Property	Value	Unit
Density	1190	kg/m ³
Heat capacity	1470	J/(kg·K)
Thermal conductivity	0.18	W/(m·K)
Coefficient of thermal expansion	7.0e-5	1/K
Young's modulus	3.2e9	Pa
Poisson's ratio	0.35	1

범위로 변화시키고 각 출력 별로 3번씩 실험하여 평균 온도 결과 값을 얻었다. Fig. 2(b), (c)에서 나타난 바와 같이 열화상 카메라로 온도분포를 확인하였으며, 출력 변화에 따른 온도를 측정하여 시뮬레이션 기본 데이터로 사용하였다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 파라미터 설정

다중적층 소재 용접 시 일어나는 다양한 온도분포 및 시뮬레이션 변수에 따른 온도분포를 예측하기 위하여 유한요소 해석 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 사용된 열원은 식(1)과 같이 3D Gaussian beam의 형태로 가정하였다^[9-10].

$$Q(x, y, z) = Q_0(1 - R_c) \frac{1}{\pi \sigma_x \sigma_y P_{dp}} e^{-sf \left[\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right]} e^{-\left| \frac{z}{P_{dp}} \right|} \quad (1)$$

Table 2 Material properties of steel mesh

Property	Value	Unit
Density	2189	kg/m ³
Heat capacity	1320.75	J/(kg·K)
Thermal conductivity	6.828	W/(m·K)
Coefficient of thermal expansion	12.3e-6	1/K
Young's modulus	205e9	Pa
Poisson's ratio	0.28	1

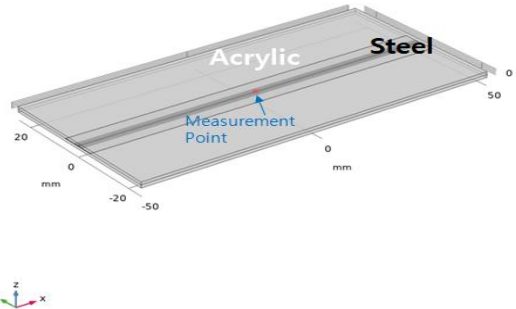


Fig. 3 Computer simulation model and temperature probing point (measurement point)

여기서, Q_0 는 열원의 최대출력, x, y, z 는 공간좌표, R_c 는 표면반사도, sf (Shape factor)는 레이저빔의 형상계수, σ_x, σ_y 는 x 축, y 축 방향의 빔 반경, P_{dp} (Skin depth)는 레이저 빔의 침투깊이를 의미한다.

또한, 표면반사도(R_c)는 투과율 실험에서 얻은 값을 사용하였다. σ_x, σ_y 는 번 페이퍼(burn paper)를 이용하여 실제 실험한 레이저빔의 크기를 측정하여 사용하였다. 또한 시뮬레이션 시 폴리머의 물성치는 Table 1과 같이 참고하여 사용하였다.

천이소재로 사용하는 Steel 소재의 Wire mesh의 물성치는 Wire mesh사이의 공간을 Acrylic의 물성치로 가정 하였다. 이때 정량값은 식(2)를 이용하여 해당 크기에 대한 구성비로 계산하였고, 결과적으로 약 15%의 Steel과 85%의 Acrylic로 구성된 것으로 가정하였다. 최종적인 시뮬레이션용 물성치로 Table 2와 같이 물성치를 수정하여 적용하였다.

$$V \times \rho = m \quad (2)$$

여기에서 V 는 각 소재의 부피(m³), ρ 는 각 소재의 밀도(kg/m³), m 은 각 소재의 질량(kg)이다.

Fig. 3은 시뮬레이션용 도메인이며, 모델링은 실제 실험시편과 같은 크기의 폭 50mm, 길이 100mm, 두께 1mm로 가정하였다. 또한 온도측정은 모델의 정중앙의

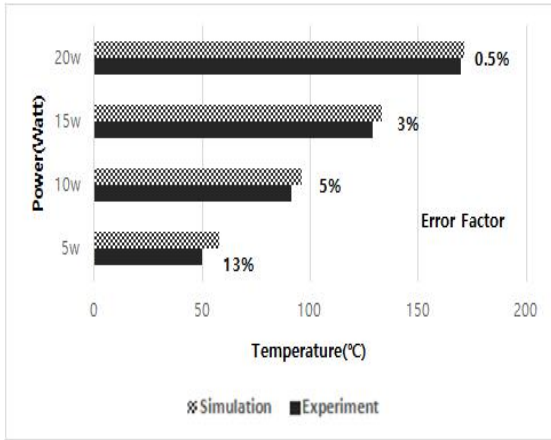


Fig. 4 Simulation results and Error factor

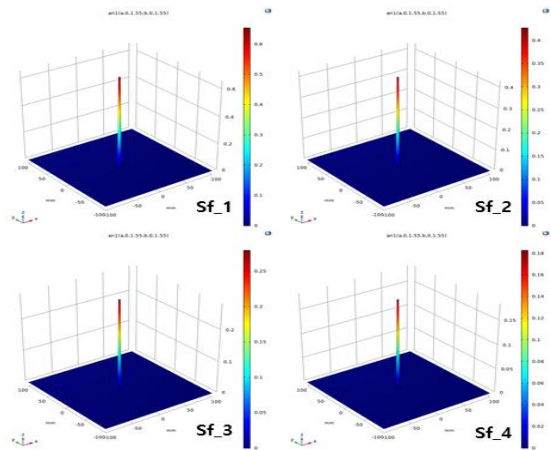


Fig. 5 Power distribution of Gaussian beam by Shape factor

온도를 측정하였다. 시뮬레이션의 경계조건은 자연대류 조건을 사용하여 설정하였다. 그리고 sf , P_{dp} 등 변수들의 값을 변화시키면서 열화상 카메라로 측정된 실제온도와 비교하면서 시뮬레이션과 실제값의 차이를 유효화(validation) 하였다. 또한 변수들을 변화시키면서 최적의 파라메타 값을 도출하였다.

실제 실험결과와 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 Fig. 4에 비교하였다.

이후 파라미터별 시뮬레이션은 이전 실험에서 얻은 최적의 파라메타 값과 함께 실제 실험결과 와 오차율이 가장 적었던 20W를 기준으로 진행하였다.

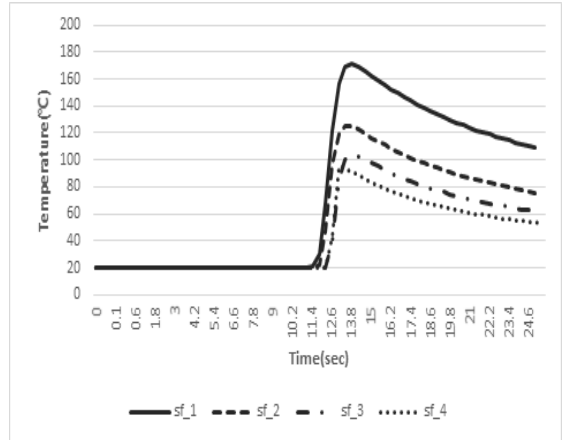


Fig. 6 Distribution of temperature by Shape factor

3.2 파라미터별 시뮬레이션 결과

3.2.1 Shape factor 영향 분석

3.1절에서 제시된 파라미터를 바탕으로, Shape factor 값에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 출력은 20W로 고정하였고 시뮬레이션으로 계산된 온도는 170°C였다.

선행연구 시뮬레이션으로 찾은 최적의 Shape factor의 값은 1이었지만, 본 실험에서는 다양한 값에 대한 실험을 진행하였으며, Fig. 5에서는 Shape factor에 따른 입열량 변화를 추적한 결과를 보여주고 있다. 결론적으로 shape factor 값이 작을수록 높은 입열량을 가진 것으로 분석되었다.

시뮬레이션 시 Shape factor에 대한 온도 영향을 알아보기 위해서 offset 양을 1, 2, 3 그리고 4로 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과가 Fig 6에 도시 되었는데, 정리된 바와 같이 shape factor가 1일 때, 170°C 내외 였고, 2일 때 120°C, 3일 때 100°C, 4일 때 온도는 90°C도 내외로 상승하는 것을 알 수 있었다.

offset 양이 증가할수록 용접부 온도는 하강하는 것을 볼 수가 있으며, 이는 Gaussian Beam 레이저빔 입열량 감소에 의한 것으로 판단된다.

3.2.2 Skin depth 영향 분석

3.2.1과 같이 다양한 Skin depth 값에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 선행연구에서 사용한 시뮬레이션으로

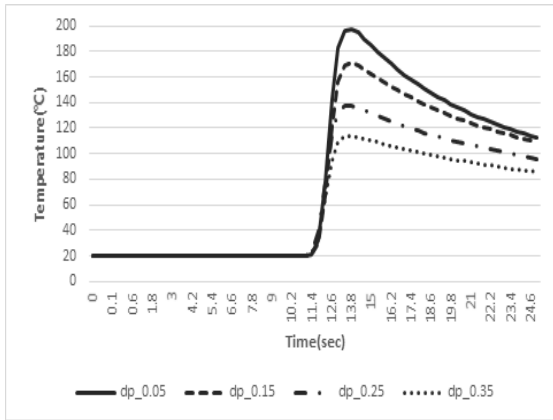


Fig. 7 Distribution of temperature by Skin depth

찾은 최적의 Skin depth 값은 0.15였으며, 이를 기준으로 실험을 수행하였다.

Fig. 7에서 나타난 바와 같이 offset 양은 0.05, 0.15, 0.25, 0.35로 변화시켜 시뮬레이션을 진행 하였다. Skin depth가 0.05일 때, 200°C 내외였고, 0.15일 때 170°C, 0.25일 때 140°C, 0.35일 때는 110°C 내외로 상승하는 것을 알 수가 있었다.

따라서, Skin depth의 영향은 offset 양이 증가할수록 용접부 온도는 하강하는 것을 볼 수 있었다. Skin depth가 높을수록 용접이 일어나는 계면으로부터 거리가 멀어져 용접부 온도가 감소하는 것으로 계산되었다.

4. 결론

레이저 투과용접을 이용한 폴리머의 접합 공정에 Steel 소재의 Wire mesh를 추가하여 용접할 때 발생하는 온도분포를 실험적 방법과 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 예측하였다.

본 연구에서는 980nm의 다이오드 레이저를 이용하여 용접을 하였고, 투명 PC소재를 통과한 레이저빔이 하부 ABS소재의 계면에 흡수되어 모재의 온도가 상승되는 것을 확인하였고, 열화상카메라를 사용하여 용접할 때 발생하는 실시간 온도분포를 측정하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 실험결과를 바탕으로 진행하였고, 다양한 파라메타를 변화시키면서 시뮬레이션과

실험결과를 비교하였다.

Steel 소재의 Wire mesh는 구성비를 계산하여 물성치를 가정하였고, 다양한 시뮬레이션 파라메타 중 Shape factor와 Skin depth는 크기가 커질수록 온도분포는 떨어지는 것을 알 수 있었다. Shape factor는 크기가 커질수록 Gaussian Beam의 형상이 완만해지면서 중심부에 가해지는 입열량이 줄어들어 용접부의 온도가 떨어졌으며, Skin depth의 경우 값이 커질수록 입열량의 깊이가 깊어져서 온도를 측정하는 용접 부계면으로부터 거리가 멀어져 온도측정 값이 줄어들었다.

향후 실험적 방법과 시뮬레이션을 반복적으로 비교 검증 하는 연구를 하면, 다양한 용접 파라메타를 이용하여 시뮬레이션에서 최적의 실험조건을 찾는 데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

후 기

“이 논문은 한국연구재단 연구비 지원 (2019R1F1A1-062594)에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Choi, D., Shin, K., Han, Y., Hong, M., Cheong, S., Jeong, J., Na, K. and Ryu, H., “Experimental Evaluation of Defects in Laser-Transmission Welding of Heterogeneous Polymer Materials,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 30, No. 2, pp. 134-141, 2021.
2. Han, C., “A Study on the Identification of Polymer Joint Quality Based on Laser Bead Shape Using Deep Learning,” Master thesis, Department of Mechanical Engineering Graduate School, Keimyung University, Republic of Korea, 2021.
3. Kim, T. and Choi, H., “Study on Laser Welding of Al-Cu Dissimilar Material by Green Laser and Weld Quality Evaluation by Deep Learning,” Journal of Welding and Joining, Vol. 39, No. 1,

- pp. 67-73, 2021.
4. Bang, H., Oh, C., Ro, C., Park, C. and Bang, H., "Analysis of Thermal and Welding Residual Stress for Hybrid Welding Joint by Finite Element Method," Journal of Korean Welding and Joining Society, Vol. 25, No. 6, pp. 565-570, 2007.
 5. Kim, D., Jeon, I., Park, H. and Seo, K., "Modification of Polypropylene for Improving the Laser Transmission Weld ability to Polycarbonate," The Polymer Society Of Korea, Vol. 37, No. 6, pp. 753-763, 2013.
 6. Seo, M., Ryu, K. and Nam, G., "Study on the Laser Transmission-Welding of Thermoplastics," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 34-40, 2005.
 7. Han, S., Han, S. and Kim, S., "A Review on Plastic Welding Technology with Diode Laser," Journal of Korean Welding and Joining Society, Vol. 26, No. 4, pp. 324-330, 2008.
 8. Song, C. and Choi, H., "Laser Energy Optimization for Dissimilar Polymer Joining," Journal of Welding and Joining, Vol. 32, No. 2, pp. 63-69, 2014.
 9. Choi, H., "Analysis of Heat Transfer by Various Laser Beam Patterns in Laser Material Process," Journal of the Korea Society of Manufacturing Process Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 37-44, 2018.
 10. Choi, H., "Analysis of Laser Heat Distribution in Al-Cu Welding in Laser Material Process," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 1-7, 2021.