

이종폴리머 접합을 위한 레이저 에너지 최적제어 기법

송치훈* · 최해운**†

*계명대학교 융합대학원 지능형자동차공학과

**†계명대학교 기계자동차공학과

Laser Energy Optimization for Dissimilar Polymer Joining

Chi Hun Song* and Hae Woon Choi**†

*Graduate School of Technology Convergence, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

**Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

†Corresponding author : hwchoi@kmu.ac.kr

(Received April 1, 2014 ; Revised April 21, 2014 ; Accepted April 21, 2014)

Abstract

Dual laser heat sources were used for polymer based material joining. An infrared camera and thermocouple DAQ system were used to correlate the temperature distribution to computer simulation. A 50 degree tilted pre-heating laser source was acting as a heating source to promote the temperature to minimize thermal shock by the following a welding heat source. Based on the experimental result, the skin depth was empirically estimated for computer simulation. The offsets of 3mm, 5mm and 10mm split by weld and preheat were effectively used to control the temperature distribution for the optimal laser joining process. The closer offset resulted in an excessive melting or burning caused by sudden temperature rising. The laser power was split by 50%, 75% and 100% of the weld power, and the best results were found at 50% of preheating. To accurately simulate the physical laser beam absorption and joining optical properties were experimentally measured for the computer FEM simulation. The simulation results showed close correlation between theoretical and experimental results. The developed dual laser process is expected to increase productivity and minimize the cost for the final products.

Key Words : Laser process, Polymer joining, Skin depth, PC, ABS, Dual laser

1. 서 론

각 산업 분야에서 환경 규제가 강화 되면서 친환경 공정으로 제품 생산환경 변화가 가속화 되고 있으며, 그 중 레이저 산업이 미래 생산기술 방법으로 각광을 받고 있다. 레이저는 개발초기부터 현재까지 비약적인 성장을 이루어 오면서 산업의 다양한 분야에서 이용되어 오고 있다. 대표적인 고밀도 에너지 열원인 레이저는 높은 신뢰도와 취급의 용이성 때문에 전자산업은 물론 자동차 산업, 증공업, 전기, 반도체 산업 전반에서 그 쓰임이 꾸준히 증가 하고 있다¹⁻³⁾.

레이저의 최대 장점은 비 접촉으로 가공하기 때문에

접촉으로 인한 공구변형이나 정밀도 저하, 그리고 마찰로 인한 예상치 못한 열발생을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 또한, 최근에 많이 사용되고 있는 다이오드 레이저는 반도체 기반으로 개발되어 효율이 높고 취급이 용이하여 기존 열원을 빠르게 대체 하고 있다. 또한, 높은 에너지 효율로 인해서 유지운영비가 적게 들어서 원가절감에도 기여하며, 높은 장비 신뢰성과 청정한 유지관리로 인해서 생산공정의 첨단화 및 환경개선에도 기여를 하고 있다.

고분자화합물인 폴리머는 낮은 온도에서 성형성이 매우 우수하고, 무게 대비 강도가 좋아서 자동차 내외장재에 많이 되고 있다. 이러한 폴리머를 1차 성형 후 접합공정을 통해서 다양한 어셈블리를 만드는데, 이 때

이종재료 접합시 접착제로서 에폭시, 폴리우레탄 또는 메타아크릴 베이스 소재를 이용 한다⁴⁻⁶⁾.

접착제는 습기가 있는 환경에서도 매우 빠르게 경화되는 장점이 있고, 본드는 플라즈마 예열 처리된 플라스틱에도 매우 적합하여 높은 신뢰성을 담보 할 수 있다. 또한, 경제성이 뛰어나고 비교적 작업의 숙련도가 낮아도 되는 장점을 가지고 있다. 하지만, 화학조성이나 제조사의 혼합비 조성에 따라 매우 다양한 특성을 발휘 하고, 제조공장의 환경오염 및 원자재 가격상승으로 인한 원가 부담이 문제점으로 지적되고 있다.

이러한 문제를 보완하기 위하여 최근 들어 그린생산 기술이 각광을 받고 있으며, 대체 기술로 레이저를 이용한 접합이 많이 사용되고 있으며, 고신뢰도의 제품생산에도 많이 적용되고 있다.

폴리머 이종재료의 접합시 이용되는 레이저 접합방법은 상부의 투과성이 좋은 폴리머 재료를 이용하여 레이저의 출력을 하단의 폴리머에 전달하여 계면에서 접합하는 방법이다. 이때 상부의 재료는 조사되는 레이저 파장에 비교적 투명하고, 하부의 소재는 흡수가 잘되는 폴리머를 사용하는 것이 좋기 때문에 소재의 광학적 특성을 잘 이해하는 것이 매우 중요하다⁶⁾.

레이저는 종류별 특성이 다양하기 때문에 접합하고자 하는 소재와 레이저의 상호 작용을 높일 수 있도록 선택되어야 한다. 레이저의 특징을 잘 이용하면, 빠른 속도의 가공이 용이 하기 때문에 일반 기계가공에서 다루기 어려운 유리나 세라믹과 같은 물질의 가공도 쉽게 수행할 수 있다. 또한 다른 장비와의 호환성이 좋아 자동화 공정이 비교적 쉬운 장점도 있다.

컴팩트한 레이저의 출발은 반도체를 기반으로 한 다이오드 레이저이며, 일상용 레이저 빔포인터에서부터 레이저프린터 그리고 고출력 다이오드레이저를 이용한 재료 가공 분야로 확대 되고 있다. 재료가공에 사용되는 고출력 다이오드레이저는 기존의 기체 및 고체 레이저에 비해서 운용비가 상대적으로 저렴하며 장치의 소형화가 가능하여 산업 분야에 대한 적용이 증가되고 있다. 다이오드 레이저는 발진 특성상 타 레이저 빔에 비해서 빔 모드가 비교적 좋지 못하나, 좁은 영역에 집광을 할 필요가 없는 폴리머 접합에 비교적 용이하게 사용 될 수 있다⁹⁾.

폴리머 접합은 폴리머의 특성상 완전한 용융상태에서 진행되지 않고 두 소재가 서로 크로스 링크 (Cross Link) 하기 좋은 유리전이 온도이상에서 서로 근접하여서 진행하는 것이 일반적이다. 폴리머는 발화점이 금속에 비교적 낮기 때문에 급격한 소재 가열시 탄화 또는 기화가 일어나기 쉽다. 따라서, 일정시간 동안 서서

히 온도를 상승시켜서 접합하기 좋은 온도로 가열하는 것이 중요하다. 하지만, 생산현장에서는 용접속도가 생산성과 직결되기 때문에, 단시간에 접합을 하는 것이 필요하므로 속도와 품질의 최적점을 찾는 것이 필요하다⁷⁻⁸⁾.

본 논문에서는 싱글 및 듀얼 레이저를 이용하여서 폴리머 접합을 위한 최적의 레이저 에너지 분산기법을 연구한 결과를 소개하고자 한다. 접합 공정시, 급격한 온도 상승으로 인해서 발생 할 수 있는 재료의 손상을 최소화 하기 위해서, 예열시스템을 이용하여서 재료를 용접 직전에 미리 가열하여서 이러한 손상을 최소화 하는 공정이 제안 되었다. 또한, 실험결과와 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 비교검증 하기 위해서, 열화상 카메라 데이터 및 열전대 실험 데이터를 서로 비교 검증 하였다. 또한, 듀얼 레이저의 간격 (offset)을 변형하여서 열전달 특성 및 용접특성을 시험분석 하였다.

2. 실험의 방법

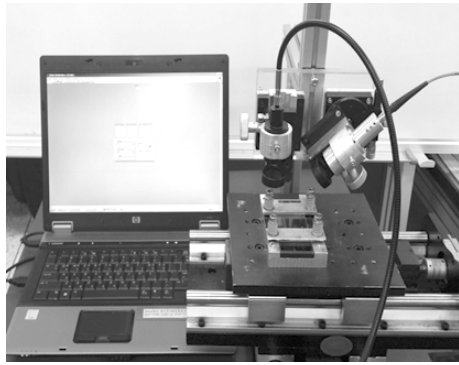
2.1 실험 장치 셋업

본 연구에 사용한 레이저투과용접은 808nm 및 980nm 파장의 레이저빔에 비교적 투명성 (Transparent)이 우수한 폴리머 (Polycarbonate, PC)를 상층에 배치하고, 동일 파장에 흡수성이 상대적으로 우수한 폴리머 (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS)를 하부에 배치하였다. 상부에 조사된 레이저 빔은 접합 계면인 ABS 표면에 도달하면서 흡수된 열이 전도 (Conduction)에 의해 두 폴리머가 용융되어 접합되는 원리를 이용하였다.

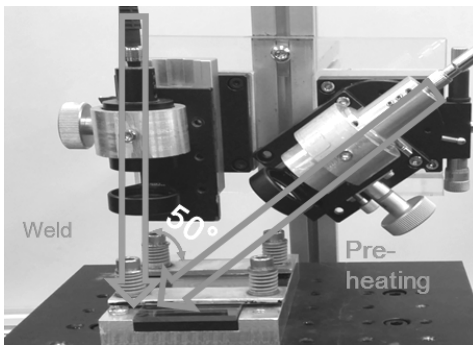
본 공정에서 사용된 두 폴리머는 광학적 특성으로는 서로 이종이지만, 두 소재 모두 열가소성 수지로서 극성 (Polarity)에 대한 친화성이 매우 우수하다. 실험에 사용된 다이오드 레이저는 30Watt 및 60Watt의 출력을 가지는 808nm와 980nm의 서로 다른 2개의 파장을 사용하였다. 또한, Fig. 1에 예시된 바와 같이 서로 50°의 각도를 유지하도록 레이저 빔을 배치 하였으며, 예열 열원용 레이저의 파장은 980nm 를 그리고 용접 열원용은 808nm 레이저를 사용하였다.

실시간 온도측정을 위해서 FLIR™ 열화상 카메라와 열전대를 사용하였다. 또한, 실험결과를 이론적 검증 및 컴퓨터시뮬레이션으로 해석하기 위해서 다중물리해석 툴인 COMSOL™ Multiphysics가 사용되었다.

소재의 광학적 특성은 선행연구에서 조사된 결과를 활용하였다. 광학적 특성은 재료의 광학적 특성인 반사율을 알아보기 위해 입사된 후 반사되어 나오는 출력을 측정해야 하나 측정에 어려움이 있기에 폴리머가 이상



(a)



(b)

Fig. 1 Experiment setup (a) system setup (b) arrangement of weld and pre-heating

적으로 매끄러운 표면을 가지고 있다는 가정하였다. 선행 실험처럼 매질의 굴절률의 차이에 의해 발생하는 경면 반사에 의한 반사 손실만이 발생한다고 가정하고 경면반사에 의한 손실을 식(1)에 의해 계산해 보았다.

$$R_L = \frac{(n - m)^2}{(n + m)^2} \times 100 \quad (1)$$

(n: polymer의 굴절지수, m: air의 굴절지수)

여기서 PC의 경우 표면의 상태나 제조사별 조성의 차이로 인해서 변하므로 1.4~1.6라고 가정을 하고, 공기의 굴절지수 m은 1이라고 가정을 하면, 반사율은 2.8~5.3%이 되는 것을 알 수가 있다. 통상적인 반사율을 5% 정도로 가정하고 시뮬레이션 하였고, 굴절에 의한 내부 산란만 가정하고, 가열과 내부조직 변화에 의한 내부 산란은 무시하였다.

2.2 폴리머 접합 실험

장치를 셋업한 후 808nm영역의 단일과장만을 이용하여 180 mm/min의 속도로 시편을 이송하면서 온도 분포를 열화상 카메라로 측정하였다.

Fig. 2에서 나타난 바와 같이 열화상 카메라로 온도

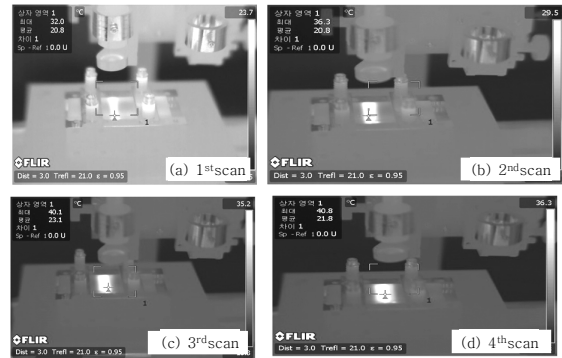
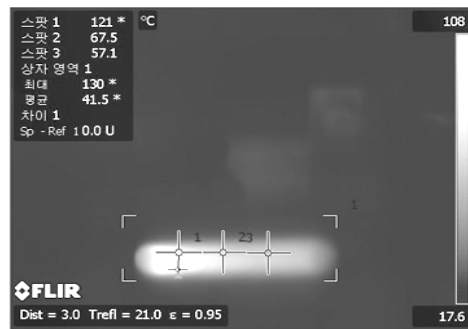


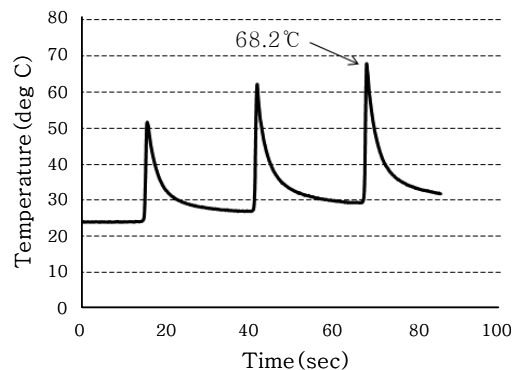
Fig. 2 Temperature measurement by IR camera

분포를 추적할 수 있었으며, 레이저 스캔 반복에 따라서 온도가 점차적으로 상승됨을 알 수 있었다. 하지만, 열화상 카메라의 데이터 획득속도가 느리고, 해상도가 다소 떨어지는 단점이 있었다. 또한, 강한 레이저 빛으로 인해서 주변의 온도가 제대로 감지되지 않아서, 레이저빔 주위의 온도를 정확히 측정하는데 한계가 있음이 발견되었다.

따라서 레이저 열원부 및 열원주위의 순간 온도분포는 열전대 (Thermocouple)을 이용하여 초당 100 data를 정밀 취득하여서 분석하기로 하였다. 다만, 열화상 카메라는 열원에서 다소 거리가 떨어진 접합부의 전반적인 온도측정에 도움이 되므로, 실험에 병행하기로 하였



(a)



(b)

Fig. 3 Temperature Correlation of (a) IR image (b) Thermocouple data

으며 열전대와 열화상 카메라의 상관관계는 Fig. 3과 같이 비교 하였다. 샘플 측정에서 열화상 카메라에서 67.5°C 로 감지된 온도가 열전대에서 68.2°C 로 감지가 되어서 높은 상관관계를 보였다.

3. 실험의 결과 및 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 파라미터 설정

듀얼레이저로 접합시 일어나는 다양한 현상 및 변수에 따른 접합특성을 예측하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행 하였다. 레이저빔 열원은 식(2)에서 표현된 바와 같이 2차원 타원형태의 열원과 깊이방향 지수함수 형태로 구성이 되었다¹¹⁾.

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

여기서, Q_0 는 열원의 침투출력, x, y, z 는 공간좌표, R_c 는 표면반사도, σ_x, σ_y 는 x 및 y 방향의 빔 반경, 그리고 A_c 는 표면 흡수층 두께 이다.

레이저 빔을 이용한 열전달해석에서 에너지소스 표현은 표준정규분포 (Gaussian) 형태의 열원으로 가정하고, 빔의 형태를 형상계수 (Shape Factor)를 사용하여 고에너지빔의 형태를 실제 실험결과와 근접하게 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 또한, 원형의 Gaussian 이 아니라 타원형 (Elliptical heat source) 으로 가정하기도 하며, 3차원 열원의 경우 Double elliptical heat source 로 가정하여 실제 빔의 형태와 유사하게 시뮬레이션 하여 예측도를 높인다.

본 연구의 시뮬레이션 형태는 흔히 표면 흡수두께 (Skin Depth) 불리 우는 3차원 영역에 레이저가 대부분 소입이 된다고 가정하였다. 에너지 침투 영역을 정확히 모사하기 위해서 지수함수 형태의 에너지 분포식을 사용하였다. 표면 흡수두께는 금속의 경우¹⁰⁾,

$$J = J_s e^{-d/\delta} \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_r\mu_0}} \quad (4)$$

로 표현이 되고, 여기에서 ρ 는 저항, ω 는 전류의 각주파수, μ_r 과 μ_0 는 물질의 자화도와 진공상태의 자화도를 의미 한다.

하지만, 금속의 경우는 식(3)와 식(4)의 형태를 쉽게 계산 할 수 있지만, 폴리머의 경우는 저항 값이 크고 자화도가 낮고 제조사별로 그 값이 차이가 있기 때문에

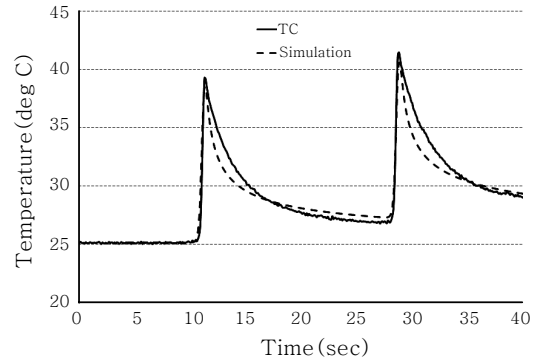


Fig. 4 Temperature Comparison of TC and Simulation

이론적 값 도출이 쉽지가 않다. 따라서, 본 연구에서는 레이저 빔의 초기 강도가 $1/e$ (약 0.37)로 감쇄되는 구간을 실험적 방법으로 구하여서 예측하기로 하였다.⁹⁾ 시뮬레이션시 폴리머의 물성치는 참고자료⁷⁾에서 예시된 값을 사용하였으며, 자연대류 조건을 사용하여 경계조건을 설정하였다. 선행 연구에서 제시된 방법으로 Ac 값을 변화시키면서 시뮬레이션에서의 온도분포와 열전대로 측정된 실제 온도를 비교하면서 근접하는 Ac 값을 도출 하였다. 실험결과 및 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 Fig. 4에 비교 되어 있다.

경계면에서 열전대로 온도측정을 한 결과 레이저빔에 열전대가 직접 노출이 되어서 순간온도 상승이 되었으며, 정확한 폴리머 온도 측정이 어려웠다. 따라서, 접합부 온도 측정은 하부 폴리머를 통해서 수행 되었으며, 하부 폴리머에 구멍을 뚫어서 경계면에서 하부로 약 1mm 떨어진 곳에서 측정을 하였다.

3.2 싱글 및 듀얼빔 시뮬레이션

3.1의 결과를 바탕으로 싱글 및 듀얼빔 시뮬레이션을 수행 하였다. Fig. 5(a)는 4Watt의 출력으로 용접속도 180mm/min 로 열원이 이송시 발생하는 온도분포를 보여주고 있으며, Fig. 5(b)는 5mm의 offset을 두고 예열 (Preheating) 레이저 소스가 이송시 발생하는 온도 분포를 보여 주고 있다.

듀얼 빔으로 용접시 offset 에 따른 온도 영향을 알아보기 위해서 offset 양을 3mm, 5mm 그리고 10mm로 변화시키면서 시뮬레이션을 수행 하였다. 그 결과가 Fig. 6에 도시 되었다. Fig. 6(a) 나타난 바와 같이 용접출력 4 Watt, 예열출력 4 Watt를 조사하였을 때, 초기예열에서는 온도상승이 60°C 부근 이었으나, 뒤이은 용접열원으로 인해서 최대 80°C까지 상승하는 것을 알 수가 있었다.

또한, Fig. 6(b) 에서 나타난 바와 같이 offset 양이

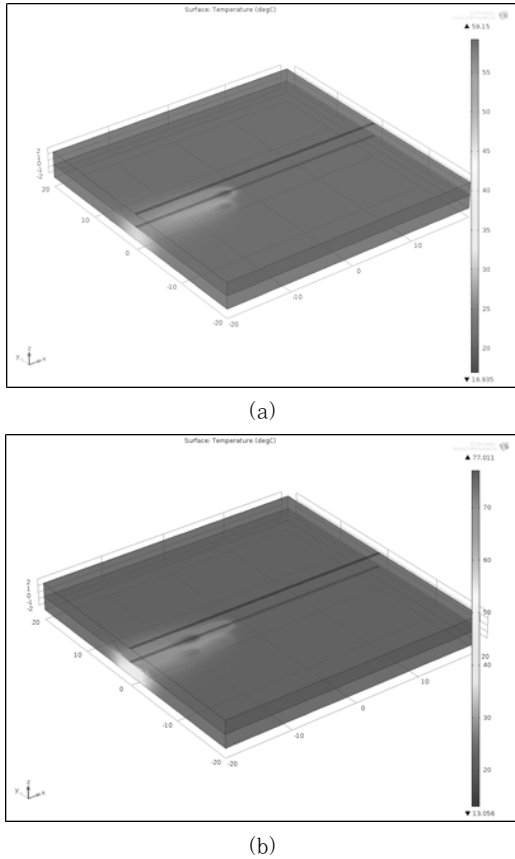


Fig. 5 Temperature distribution by laser beam heating (a) Single beam (b) Dual beam

증가 할수록 용접부 온도는 하강하는 것을 볼 수가 있으면, 이는 예열과 용접시의 시차 동안 발생하는 내부 냉각에 의한 것으로 판단 된다. 여기에서 주목 할 것은 예열에 의한 초기온도와 용접에 의한 상승온도와의 차이인데, 폴리머 접합시 최단시간에 접합이 가능한 온도로 상승시키되, 폴리머의 급격한 온도 상승으로 인해서 폴리머가 발화되거나 기화되는 것을 피해야 한다.

3mm offset 시에는 59°C에서 81°C로 상승한 반면, 10mm offset 시에는 72°C 까지만 상승을 하였다. 결론적으로 4 Watt의 출력에서는 급격한 온도 상승은 보이지 않아서 5mm 과 10mm offset 실험에서 적합한 것으로 분석이 되었지만, 3mm offset의 경우는 일부 손상이 발견이 되었다.

예열효과를 최적화하고 이에 대한 분석을 위해서 offset을 3mm로 고정한 후, 예열 출력을 용접출력의 50%, 75% 그리고 100%로 설정하여 실험하였으며 그 결과가 Fig. 7에 정리 되어있다.

실험결과, offset 3mm에 예열출력을 용접출력과 동일하게 4 Watt로 했을 시 중앙부분 (레이저 침투출력 부분)에서 일부 손상이 일어 났음이 확인이 되었다. 예열출력 3Watt에서도 일부 손상이 발견되었으나, 초기

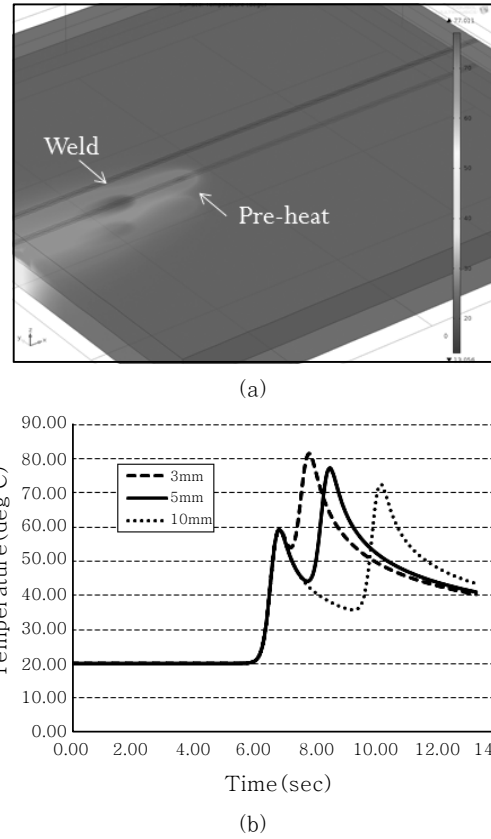


Fig. 6 Temperature measurement (a) Weld and preheat location (b) effect of offset

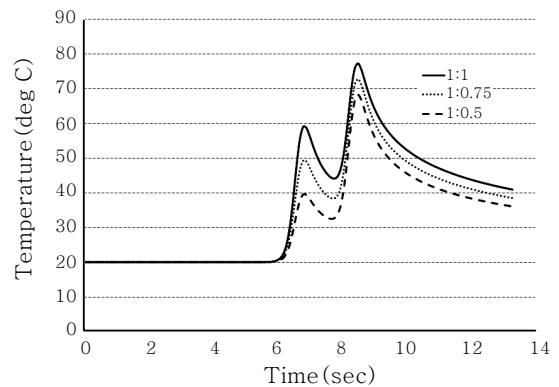
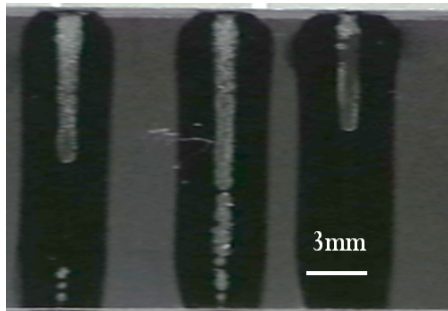


Fig. 7 Temperature distribution for different energy split

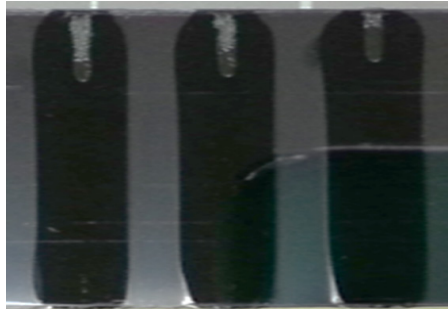
구간 (용접속도 가속구간) 일부를 제외하면 전반적으로 양호한 품질의 접합이 이루어 졌다.

예열과 용접출력을 합한 전체출력을 고정 (8 Watt) 하고, 예열과 용접출력을 분산하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 시뮬레이션은 용접출력 4 Watt, 6 Watt, 그리고 7 Watt 로 하고 예열출력을 각각 4 Watt, 2 Watt 그리고 1 Watt로 출력을 조정하였다.

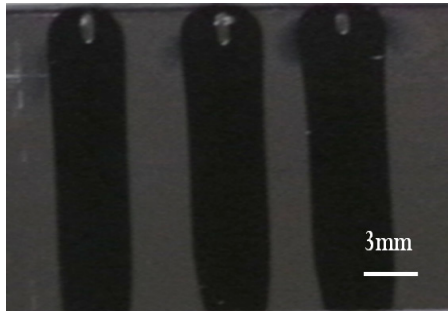
시뮬레이션 결과, 용접출력 7 Watt와 예열 1 Watt 에서는 초기 예열시 30°C 에서 93°C로 급상승 하는



(a) Weld 4 Watt, Preheat 4 Watt



(b) Weld 4 Watt, Preheat 3 Watt



(c) Weld 4 Watt, Preheat 2 Watt

Fig. 8 Preheat effect for welding

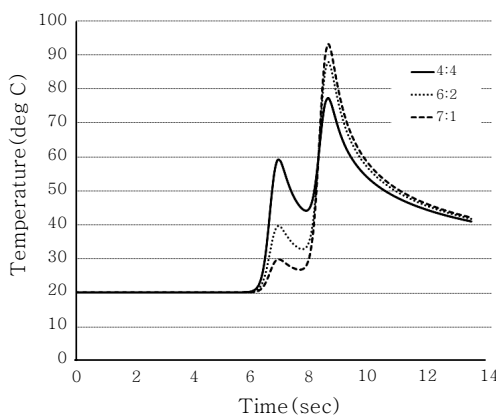


Fig. 9 Distribution of temperature by power split with fixed total power

것으로 나타 났다. 이 경우는, 실험 결과인 Fig. 7과 8에서 나타난 바와 같이 침투에너지가 조사되는 일부 구간에 손상이 일어날 것으로 우려가 되므로 피해야 할

것으로 판단되며, 용접출력 6 Watt와 예열 2 Watt도 비슷한 형태의 결과가 도출 될 것으로 예측이 된다.

4. 결 론

레이저를 이용한 폴리머의 접합공법에 듀얼레이저를 사용하여서 예열열원과 용접열원의 간격 및 전체 출력에서의 분기량에 따른 온도분포와 접합부품의 손상을 실험적 방법과 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 예측하였다.

본 연구에서는 980nm 의 파장을 가지는 레이저를 사용하여 예열을 하였고, 808nm 파장의 레이저를 사용하여서 비정질계열의 투명 PC 재료를 통해서 레이저 빔이 하부 ABS 재질에 흡수되어 모재의 온도가 상승되는 것을 확인하였고, 이를 열화상카메라와 열전대 실험을 통해서 확인 할 수 있었다. 또한 실험결과를 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션을 실시 하였으며, 다양한 형태의 에너지 분포를 예시로 하여 시뮬레이션과 실험결과를 비교 하였다.

컴퓨터를 이용한 유한요소 시뮬레이션을 통해서 동일 출력을 1:1로 분기하는 것보다 용접출력의 75% 또는 50% 정도로 예열하는 것이 폴리머 접합시 효과적이고 신뢰도 높은 공정을 구현할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한, 예열열원과 용접열원이 지나치게 인접하면 급격한 온도상승으로 소재를 과도하게 손상시킬 수 있어서 용접속도에 따라서 일정거리를 선행하는 것이 훨씬 효과적인 것으로 관찰되었다.

연구초기 808nm 및 980nm 파장에서의 민감의 흡수도가 기대되었으나, 파장의 크지 않아서 민감한 흡수도에 차이가 발견 되지 않았다. 하지만, 적외선 영역에서의 차이는 클 것으로 판단이 되어서 추후 연구를 수행할 예정이다.

향후 시뮬레이션과 실험적 방법을 반복적으로 수행하여 서로 비교 검증하는 추가연구를 하면, 가상공간에서 에너지 분산기법을 이용한 최적 공정설계가 도출 될 것으로 전망 된다.

후 기

본 연구논문은 한국연구재단 일반 연구자 지원사업 (2012-0001535) 으로 수행 되었습니다.

Reference

1. C. Lee, S. Nam, H. Shin[Co-authors] : Ministry of Science and Technology, Korea Institute of Science and Technology Information[Co-editor], Laser Processing Technology Trends, (2006) (in Korean)

2. J. Yoo, C. Lee, H. Choi, Hybrid Process for Polymer Welding, *Journal of Korean Society of Laser Processing*, **28-3** (2010), 47-53 (in Korean)
3. J. Lee, J. Seo, D. Shin, S. Kim : Trend of Laser Assisted Machining, *Journal of Korean Society of Laser Processing*, **10-1** (2007), 1-10 (in Korean)
4. H. Shin, H. Choi, S. Kim, Hybrid process for lubricant groove on linear guides, *Int. J. Adv. Manf. Technol.*, **46** (2010), 1001-1008
5. J. Seo, Y. Han : Laser Welding in Automotive Industry, *Journal of KWS*, **12-2** (1994), 49-63 (in Korean)
6. S. Han, S. Han, S. Kim : A Review on Plastic Welding Technology with Diode Laser, *Journal of KWJS*, **26-4** (2008), 14-20 (in Korean)
7. MatWeb, (Polycarbonate material properties), www.matweb.com
8. MatWeb, (ABS material properties), www.matweb.com
9. E. Hecht, Hecht Optics, Addison Wesley, forth edition, 129-135
10. V. Vander, A. Rosen and Y. Kotsuka, Youji, RF/Microwave Interaction with Biological Tissues, John Wiley and Sons, Inc., ISBN 978-0-471-73277-8 (2006)
11. J. Lawrence, A. Peligrad, E. Zhou, L. Li and D. Morton, Prediction of melt depth in selected architectural materials during high-power diode laser treatment, *Optics and Lasers in Engineering* **35** (2001), 51-62