

# 레이저 기반 패키징 공정에서 광 다이오드 기반 플랑크 온도 측정법(PDPT)의 적용 및 성능 평가

위찬웅<sup>1</sup> · 이준원<sup>1</sup> · 우재형<sup>1</sup> · 정하경<sup>2</sup> · 정지훈<sup>3</sup> · 한승희<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 기계공학과

<sup>2</sup>한국기계연구원

<sup>3</sup>Department of Industrial & System Engineering, Texas A&M University, College Station, TX, United States

## Application and Performance Evaluation of Photodiode-Based Planck Thermometry (PDPT) in Laser-Based Packaging Processes

Chanwoong Wi<sup>1</sup>, Junwon Lee<sup>1</sup>, Jaehyung Woo<sup>1</sup>, Hakyung Jeong<sup>2</sup>, Jihoon Jeong<sup>3</sup>, and Seunghwoi Han<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

<sup>2</sup>Korea Institute of Machinery & Materials

<sup>3</sup>Department of Industrial & System Engineering, Texas A&M University, College Station, TX, United States

(Received June 14, 2024; Revised June 26, 2024; Accepted June 28, 2024)

**초 록:** 최근 투명 디스플레이 및 유연 소자의 활용도가 증가함에 따라 우수한 유연성과 강성을 갖는 폴리머 소재 기판의 사용이 증가하고 있다. 그러나 폴리머는 열에 취약하여 공정 중 온도 및 열 제어가 필수적이다. 이러한 폴리머 기판 활용의 단점을 해결하기 위해 본 연구에서는 레이저 기반의 선택적 가공 기술에 적용할 수 있는 폴리머 기판 내 레이저 가공 영역의 온도 측정 시스템을 제안한다. 레이저 가공 영역의 국부적인 온도 변화 측정을 통해 폴리머 기판의 공정 조건을 최적화하는 가능성을 제시한다. 이를 위해 플랑크 흑체 복사 원리를 기반으로 한 PDPT(Photodiode based Planck Thermometry)를 설계 및 제작하여 레이저가 입사되는 영역의 온도를 측정하였다. PDPT는 비파괴/비접촉식 온도측정 시스템으로, 레이저가 입사되는 국부적인 온도 상승을 실시간으로 측정할 수 있다. 해당 시스템을 활용하여 폴리머 기판의 레이저 가공 공정에서 발생하는 가공영역의 온도 변화를 관측하였다. 본 연구 결과, 제안된 레이저 기반 온도측정 기술은 레이저 가공 공정 중 실시간 온도 측정이 가능하며, 이를 통해 최적의 생산 조건을 확립할 가능성을 보여주고 있다. 또한, 해당 기술은 열 제어가 필수적인 미세 레이저 가공 및 3차원 프린팅과 같은 다양한 레이저 기반 공정에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract:** With the increasing use of transparent displays and flexible devices, polymer substrates offering excellent flexibility and strength are in demand. Since polymers are sensitive to heat, precise temperature control during the process is necessary. The study proposes a temperature measurement system for the laser processing area within the polymer base, aiming to address the drawbacks of using these polymer bases in laser-based selective processing technology. It presents the possibility of optimizing the process conditions of the polymer substrate through local temperature change measurements in the laser processing area. We developed and implemented the PDPT (Photodiode-based Planck Thermometry) to measure temperature in the laser-processing area. PDPT is a non-destructive, contact-free system capable of real-time measurement of local temperature increases. We monitored the temperature fluctuations during the laser processing of the polymer substrate. The study shows that the proposed laser-based temperature measurement technology can measure real-time temperature during laser processing, facilitating optimal production conditions. Furthermore, we anticipate the application of this technology in various laser-based processes, including essential micro-laser processing and 3D printing.

**Keywords:** Photodiode-based Planck Thermometry (PDPT), Laser-based packaging processes, Real-time temperature monitoring, High-resolution temperature measurement

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: shan@chonnam.ac.kr

© 2024, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<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.

## 1. 서 론

패키징 공정은 다양한 산업 분야에서 핵심적인 역할을 수행하며 제품의 안정성, 효율성 및 신뢰성을 높이는 데 중요한 역할을 한다. 레이저 기반 패키징 공정은 에너지 소자, 반도체 및 디스플레이와 같은 첨단 산업에서 요구되는 고속, 고 정밀 패키징 분야에서 그 활용도와 중요도가 커지고 있다<sup>1,2)</sup>. 이는 레이저 기반 공정이 가지는 수 마이크로미터 이내의 가공 정밀도와 원하는 영역에만 선택적으로 에너지를 전달할 수 있는 공정 유연성에 기반한다. 이러한 장점을 기반으로 레이저 공정은 미세 소자들을 전기적으로 연결하는 나노 배선 공정과 회로 패턴의 결함을 개선하는 리페어 공정 등 다양한 분야에서 제품의 성능 향상을 위해 활용될 수 있다<sup>3)</sup>.

레이저 기반 나노 배선 공정 및 회로 패턴 결함 리페어 공정에는 주로 나노 입자를 선택적으로 소결시키는 나노 솔더링(soldering) 과 표면을 가공 및 처리하는 어블레이션(ablation)기술이 사용된다<sup>4-10)</sup>. 공정 최적화를 위해 고려해야 할 핵심 요소는 레이저 가공 영역의 온도이다. 물질이 레이저 에너지를 흡수하며 발생하는 열을 이용하는 나노 솔더링과 레이저 어블레이션 기술은 강한 레이저 에너지로 인한 시편의 온도 상승을 야기한다<sup>11, 12)</sup>. 이때 과도한 에너지가 시편에 전달될 경우 시편의 표면과 인근 영역에 손상을 입힐 수 있기 때문에, 레이저 가공 영역의 온도를 측정하는 과정이 필수적이다. 특히, 나노 배선 리페어와 같은 정밀 공정에서는 고온 발생 현상이 회로 패턴이나 주변 재료에 불필요한 손상을 일으킬 가능성이 크다<sup>13)</sup>. 또한 곡면 입체 형상 소자 및 유연성 디스플레이 제작을 위해 폴리머를 사용할 경우, 폴리머의 낮은 열안정성(thermal stability)으로 인한 기판의 변형 및 손상이 발생할 수 있다<sup>14)</sup>. 따라서 레이저 공정 중에 발생하는 열을 실시간으로 모니터링하고 조절하여 레이저 공정 영역과 주변부 온도를 안정적으로 유지하는 실시간 정밀 온도 측정 시스템이 필요하다. 공정 중 실시간 온도 측정 기반의 레이저 공정 제어를 통해 다양한 공정 중에 발생하는 과열을 방지하여 공정의 효율성을 높일 수 있으며, 제품의 품질과 안정성을 유지하여 고품질의 패키징 공정을 구현할 수 있다.

현재 산업에서 널리 사용되는 적외선 온도계 및 열화상 카메라는 적용 분야에 따라 종류(금속/비금속, 유리, 특수목적용 등)가 매우 다양하며, 측정 가능한 최소 영역의 크기가 수 십에서 수백 마이크로미터 수준으로 제한된다<sup>15-19)</sup>. 높은 공간 분해능을 제공하는 온도 측정 장비가 존재하지만, 높은 비용으로 인해 상업적 활용이 어려운 실정이다. 또한 이러한 온도 측정이 중요한 공정들에 대해 기존 연구들은 실제 온도를 측정할 사례가 드물고 대부분 시뮬레이션을 통해 결과를 도출하고 있다<sup>20)</sup>. 본 연구에서 제시하는 광 다이오드 기반 플랑크 온도 측정

법(Photodiode based Planck Thermometry, PDPT)은 가공 영역에서 국부적으로 온도가 상승한 영역에서 발생하는 복사 스펙트럼의 파장 신호 성분비를 활용하여 온도를 측정하는 방법으로, 국부적인 레이저 가공 영역의 온도 측정이 가능하다<sup>21)</sup>. 이 방법은 다른 측정 장치에 비해 높은 100 kHz 이상의 측정 속도로 정밀한 온도 측정이 가능하며, 가격도 비교적 저렴하게 구축할 수 있어 상업적 활용도가 높을 것으로 기대한다.

## 2. 실 험

### 2.1. 열 방사 기반 온도 측정

레이저에 의해 가공되는 국부적인 영역의 온도를 측정하기 위해 플랑크 흑체복사 원리를 기반으로 하는 PDPT 측정법을 이용한다<sup>22)</sup>. 흑체는 방사를 값이 1인 물체로 입사하는 모든 전자기 복사를 흡수하고 방출하는 이상적인 물체이다. 흑체 복사 원리에 따르면, 절대 영도 이상의 모든 물체는 온도에 따라 고유의 전자기 스펙트럼을 방출한다. PDPT는 특정 온도의 물체가 방출하는 스펙트럼 중 두개의 파장 스펙트럼 강도 비율 변화를 이용하여 온도를 측정한다. Fig. 1 (a) 온도 별 열 방사 스펙트럼을 나타

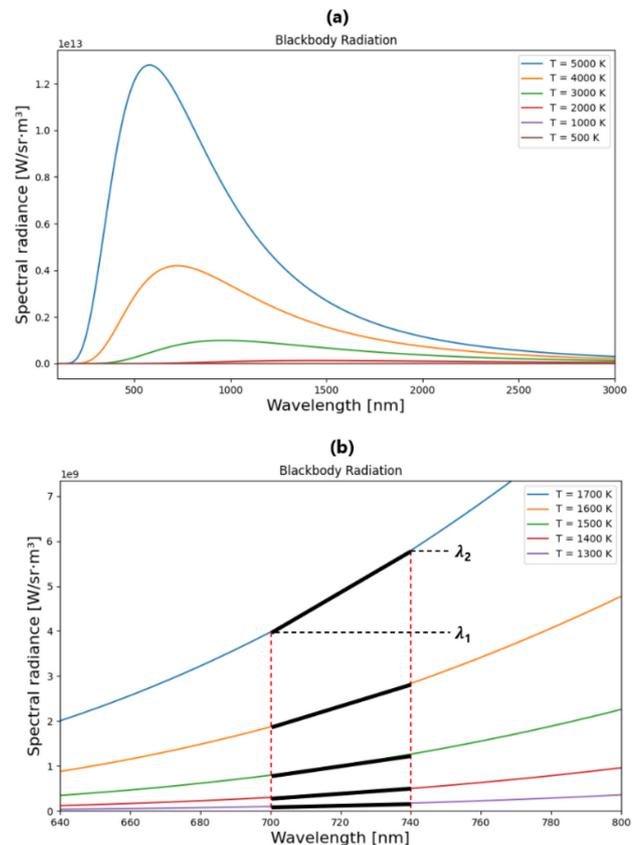


Fig. 1. (a) Planck curves representing spectral radiance at different temperatures, (b) Spectral radiance at temperature range of 1300 K - 1700 K.

낸 플랑크 곡선이며 (b)는 1300 K - 1700 K 구간에서의 온도 별 열 방사 스펙트럼을 나타낸다. 온도가 높아짐에 따라 두 파장( $\lambda_1$ : 700 nm,  $\lambda_2$ : 740 nm)에 대응하는 복사 강도의 변화량이 증가하며, 각 파장에 해당하는 복사 강도의 신호비를 통해 물체의 온도를 측정할 수 있다. 이때, 선택되는 파장은 측정하고자 하는 온도 영역과 광학계의 성능을 고려하여 선정한다. 본 연구에서는 1300 K 이상의 온도 영역을 측정하기 위한 시스템을 설계 및 구성하였다. 특정 파장의 빛을 선택적으로 받기 위해 광학 필터를 사용하고, 각 파장에 대응하는 복사강도를 측정하기 위한 광 검출기를 사용한다.

## 2.2. 플랑크 법칙의 수학적 유도

스펙트럼 복사 휘도  $B_\lambda[\lambda, T]$ 는 파장( $\lambda$ )과 온도( $T$ )에 대한 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$B_\lambda[\lambda, T] = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (1)$$

식(1)에서  $h(m^2 \cdot kg/s)$  플랑크 상수,  $c(m/s)$ 는 빛의 속도,  $k_B(m^2 \cdot kg/s^2 \cdot K)$  볼츠만 상수이다.

스펙트럼 복사 휘도는 흑체의 온도( $T$ ) 값은 해당 조건에서 방출되는 전자기파의 서로 다른 두 파장 성분( $\lambda_1, \lambda_2$ )과 각 파장 성분의 복사 휘도를 측정하는 광 검출기의 전압( $PD_{\lambda_1}, PD_{\lambda_2}$ )을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = \frac{h_c/k_B (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}{\ln(PD_{\lambda_1}/PD_{\lambda_2}) + 5 \ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (2)$$

식(2)에서 분자( $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2$ )와 분모의  $5 \ln(\lambda_1/\lambda_2)$ 는 상수이므로 이를 단순화하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{A}{\ln(PD_{\lambda_1}/PD_{\lambda_2}) + B} \quad (3)$$

식(3)에서 A, B는 보정 상수로, 본 연구에서는 텅스텐 필라멘트 전구(Q50GY/12)를 이용한 온도 교정을 통해 도출하였다. 보정 과정이 완료되면 광 검출기에서 측정된 전압의 비율 ( $PD_{\lambda_1}, PD_{\lambda_2}$ )을 통해 물체의 온도를 계산할 수 있다.

## 2.3. 실험 장치 구성

레이저 광원은 가공 영역의 열적 영향을 최소화할 수 있는 근적외선 대역 펄스 레이저(Spirit® One™ 1040-8)를 사용하였다. 가공용 레이저 빔의 경로와 온도 측정용 열 방출 신호의 분리를 위하여 근적외선 대역은 통과하고 가시광선 대역은 반사하는 다이크로익 미러

(dichroic mirror)를 사용하였다. 가공용 펄스 레이저는 다이크로익 미러를 통과한 후, 레이저 스캐너와 f-theta 렌즈를 통하여 평면 시편에 집광 된다. 레이저 집광 영역에서 에너지 전달에 따른 온도 상승 현상이 발생하며, 이때 해당 영역의 온도에 따른 흑체 복사가 발생한다. 발생된 빛은 f-theta 렌즈와 스캐너를 역방향으로 진행한 후, 다이크로익 미러에서 반사되어 노치 필터(notch filter)를 통과한다. 노치 필터는 근적외선 대역의 신호를 차단하여 가시광선 대역의 신호 측정 효율을 높이기 위해 설치한다. 노치 필터를 통과한 빛은 광분할기(beam splitter)를 통해 50:50 비율로 투과 및 반사하게 되며, 각각 반사된 빛은 측정하고자 하는 두개의 파장 필터 (700 nm & 740 nm) 통과 후, 광 검출기(APD410A)에 도달한다. 각각의 광 검출기에서 변환된 전압 신호는 오실로스코프(DPO 4032, Tecktronix)에서 동시에 출력된다. APD의 획득속도는 100 kHz이며, 오실로스코프는 80 Gs/s의 샘플링 속도로 신호를 캡처하여 나노초 스케일의 해상도로 빛의 세기 정보를 제공한다. 이를 통해 기존의 고온계(pyrometer)를 활용한 온도측정 방식보다 빠른 속도의 모니터링이 가능하다.

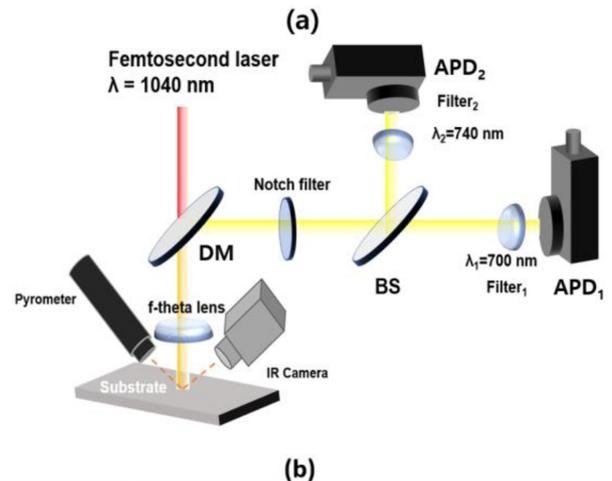


Fig. 2. (a) Schematic diagram and (b) experimental setup of the photodiode-based Planck thermometer for real-time temperature measurement at the laser focal spot.

2.4. 온도 교정

광 검출기를 통해 얻어지는 전압 비 값은 레이저 가공 영역의 온도 정보로 변환된다. 정확한 온도 측정을 위해 구축된 PDPT 시스템의 온도 교정(calibration)을 진행하였다. 필라멘트 전구에 인가하는 전류와 온도 관계를 이용하여 기준 온도 및 이에 해당하는 전자기파 스펙트럼을 방출하는 교정용 필라멘트 전구를 사용하였다<sup>23)</sup>.

Fig. 3(a)는 온도 교정용 필라멘트 전구에 인가된 전압에 따른 온도 변화를 나타내며, 본 연구에서 목표로 하고 있는 1000°C 이상의 온도 영역까지 온도가 상승한다. 해당 정보를 바탕으로 구축된 PDPT 시스템의 광 검출기에서 측정된 700 nm와 740 nm 대역 신호의 비율에 따른 온도 값을 보정한다. 앞서 유도한 플랑크 법칙에 따라 두개의 광 검출기 신호 비율에 따른 측정 영역의 온도 변화는 Fig. 3(b)에 나타내었다.

추가적으로 PDPT 시스템의 온도 측정 신뢰성을 확보하기 위하여 상용 비접촉식 고온계(IGA 320/23)와 적외선 카메라(TIM-QV)를 사용하여 측정값을 교차 검증하였다. 고온계와 적외선 카메라는 각각 교정을 완료하고 물

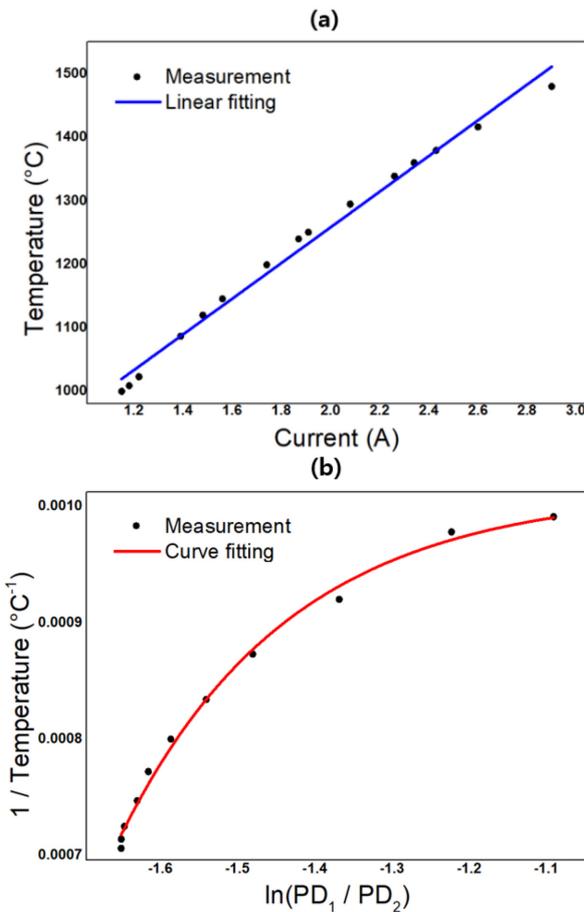


Fig. 3. (a) Calibration curve giving the temperature of the filament lamp as a function of the current. (b) Calibration curve - temperature vs. photodiode voltage ratio - with Planck thermometry fitting.

질의 방사율을 고려하여 같은 조건에서 동일 시간에 온도를 측정하였다.

2.5. 폴리머 기판 가공 공정 온도 측정

PDPT 시스템의 성능을 평가하기 위하여 폴리머 기판의 레이저 가공 공정에서 발생하는 온도를 실시간으로 측정하였다. 상용 온도 측정 장비와의 비교를 위하여 고온계와 적외선 카메라 또한 가공 공정 중의 온도를 실시간으로 측정하였다. 가공 대상은 폴리우레탄(polyurethane) 기판이며, 근적외선 펄스 레이저를 이용하여 선형 가공하였다. 가공 영역의 크기는 공간 분해능이 가장 낮은 적외선 카메라 분해능 기준으로 설정하여 진행하였다. 실험에 사용된 폴리우레탄 기판의 두께는 반도체 디스플레이에서 일반적으로 사용되는 200 μm이다.

Fig. 4는 레이저를 이용한 선형가공 공정 중시간에 따른 레이저 가공 영역의 온도 변화를 측정한 그래프이다. 앞서 설명한 바와 같이 PDPT, 고온계 및 적외선 카메라를 이용하여 동시에 폴리우레탄 기판의 가공 공정의 온도 변화를 관측하였다. 고온계와 적외선 카메라는 자체 보정을 통해 측정된 온도 값을 나타낸다. 레이저 가공이 시작되는 시점(0.8 초)부터 온도가 가파르게 상승하며, 레이저 가공이 끝난 시점(1.8 초)부터 온도가 감소한다. 이러한 경향은 세가지 온도 측정 시스템에서 동일하게 측정되었다.

Fig. 4의 회색선은 PDPT를 이용하여 측정된 원시 데이터이며, 검은색 선은 이를 중앙값으로 필터링한 값을 나타낸다. PDPT는 상대적으로 높은 측정 속도를 가지고 있어 동일한 측정 시간동안 많은 온도 정보를 측정하였으며, 이는 레이저 조사 후 온도가 가파르게 상승하는 구간에서 확인할 수 있다. 고온계와 적외선 카메라의 경우, 급격한 온도변화 구간의 데이터 획득에 한계가 있는 반면, PDPT는 빠른 응답속도로 해당 구간의 온도 변화를 높은 시간 분해능으로 측정할 수 있었다. 해당 그래프는 서로

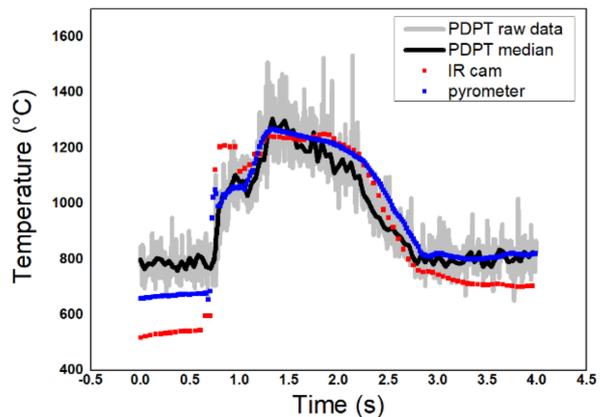


Fig. 4. Measured temperature via PDPT, IR camera, and pyrometer during laser machining of polymer.

다른 온도 측정 장비들을 동일한 시간 축에서 비교하기 위해 오실로스코프의 샘플링 속도를 100 kHz에서 250 Hz로 낮춰서 진행한 결과이므로, 다운그레이드 없이 진행할 경우 PDPT는 이 결과값보다 400배 더 높은 해상도를 가질 수 있다.

PDPT에서 측정된 원시 데이터는 상대적으로 높은 편차를 보인다. 이는 가공되는 영역이 수 마이크로미터 수준으로 매우 작아, 해당 영역에서 발생하는 열 방출 전자 기과의 신호가 상대적으로 미약하기 때문이다. 이러한 현상은 APD의 특성과도 연관이 있으며, 신호 대 잡음비(SNR, Signal to Noise Ratio)가 낮아짐에 따라 잡음의 영향이 증가하는 경향이 있다. 또한, APD의 빠른 데이터 획득 속도는 느린 가공 신호의 반응을 충분히 반영하지 못해 잡음으로 나타날 수 있다. 더불어, 매우 작은 레이저 가공 영역의 온도를 측정하기 때문에 시편의 표면 상태에 따른 잡음의 영향도 무시할 수 없다. 본 연구에서는 중앙값 필터링을 통해 이러한 문제를 보완하고 잡음의 영향을 최소화하였다.

PDPT는 800°C 이상의 온도 영역에 대하여 측정이 가능하였으며, 그 이하의 온도 대역에서는 방출되는 가시광선 대역의 신호가 약하여 정확한 온도 정보를 얻을 수 없었다. 하지만, 800°C 이상의 온도 영역에서는 고온계 및 적외선 카메라와 유사한 온도 값을 측정하였다. 이를 통해 본 연구에서 목표로 한 1000°C 이상의 온도 영역의 측정이 가능함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 연구를 통하여 레이저 기반 패키징 공정에서 레이저 가공 영역에 발생하는 열을 정밀하게 측정할 수 있는 PDPT 시스템을 설계 및 제작하였다. PDPT 시스템은 플랑크의 흑체 복사 원리를 활용하여 고해상도의 온도 측정을 가능하게 하며, 펄초 필스 레이저를 이용한 폴리머 기반 가공 실험에서 상용 온도 측정 장비인 고온계와 적외선 카메라에 비해 우수한 응답 속도기반의 온도 측정 성능을 보였다. 이러한 높은 시간 분해능의 실시간 온도 측정 기술은 레이저 공정 변수의 피드백 제어를 통해 다양한 레이저 공정을 최적화하는데 사용될 수 있다.

향후 연구에서는 PDPT 시스템의 노이즈 감소를 위한 필터링 기술 적용, 다양한 기관 및 레이저 공정 변수에 따른 온도 측정, 이론적 모델을 통한 검증, 실시간 온도 모니터링 인터페이스 개발 등을 통한 레이저 공정 제어 시스템 고도화를 진행하고자 한다. 이를 통해 PDPT 시스템의 범용성을 높이고, 다양한 기관 재료 특성에 따른 최적의 레이저 공정 조건을 확인하여 안정적인 온도 제어를 가능하게 하고자 한다. PDPT 시스템은 레이저 기반 패키징 공정의 열적 제어 문제를 해결하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대되며, 향후 다양한 분야에서의 응용 가능

성을 높이고 공정 최적화와 비용 절감 효과를 통해 제품의 품질과 안정성을 더욱 향상시킬 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 산업통상자원부 기계장비산업기술개발사업의 일환인 “곡면 입체형상 3D SiP 패키지 다축 조립시스템 개발 (과제번호: 20018154)” 및 전남대학교 학술연구비 (과제번호: 2022-2667) 사업의 지원에 의하여 연구되었음.

### References

1. Y. Yan, Y. Zheng, H. Sun, and J. a. Duan, "Review of Issues and Solutions in High-Power Semiconductor Laser Packaging Technology", *Frontiers in Physics*, 9, 669591 (2021).
2. S. Jeon, R. Park, J. Jeong, and S. W. Hong, "Laser fabrication of graphene-based materials and their application in electronic devices", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 28(1), 1-12 (2021).
3. S. Nowotny, S. Scharek, E. Beyer, and K.-H. Richter, "Laser beam build-up welding: precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition", *Journal of thermal spray technology*, 16, 344-348 (2007).
4. Y.-Y. Zhao, *et al.*, "Plasmon-enhanced nanosoldering of silver nanoparticles for high-conductive nanowires electrodes", *Opto-Electronic Advances*, 4(12), 200101 (2021).
5. C. R. Phipps, "Laser ablation and its applications", Springer, (2007).
6. C. Y. Yap, *et al.*, "Review of selective laser melting: Materials and applications", *Applied physics reviews*, 2(4), 041101 (2015).
7. A. Sharif, N. Farid, and G. M. O'Connor, "Ultrashort laser sintering of metal nanoparticles: A review", *Results in Engineering*, 16, 100731 (2022).
8. J. Noh, J. Ha, and D. Kim, "Femtosecond and nanosecond laser sintering of silver nanoparticles on a flexible substrate", *Applied Surface Science*, 511, 145574 (2020).
9. S. J. Hwang, S. V. Hwang, and J. P. Jung, "Laser Micro Soldering and Soldering Factors", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 27(3), 1-8 (2020).
10. S. J. Hwang, H. J. Kang, J. O. Kim, and J. P. Jung, "Laser micro-joining and soldering", *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 26(3), 7-13 (2019).
11. N. M. Bulgakova, V. P. Zhukov, A. Y. Vorobyev, and C. Guo, "Modeling of residual thermal effect in femtosecond laser ablation of metals: role of a gas environment", *Applied Physics A*, 92, 883-889 (2008).
12. Y. Levy, T. J.-Y. Derrien, N. M. Bulgakova, E. L. Gurevich, and T. Mocek, "Relaxation dynamics of femtosecond-laser-induced temperature modulation on the surfaces of metals and semiconductors", *Applied Surface Science*, 374, 157-164 (2016).
13. J. K. Chen, D. Y. Tzou, and J. E. Beraun, "Numerical investigation of ultrashort laser damage in semiconductors", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(3-4), 501-509 (2005).

14. S. Ravi-Kumar, B. Lies, X. Zhang, H. Lyu, and H. Qin, "Laser ablation of polymers: A review", *Polymer International*, 68(8), 1391-1401 (2019).
15. J. L. Bennett, *et al.*, "Cooling rate effect on tensile strength of laser deposited Inconel 718", *Procedia Manufacturing*, 26, 912-919 (2018).
16. P. A. Hooper, "Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion", *Additive Manufacturing*, 22, 548-559 (2018).
17. Y. Gao, J. Xing, J. Zhang, N. Luo, and H. Zheng, "Research on measurement method of selective laser sintering (SLS) transient temperature", *Optik*, 119(13), 618-623 (2008).
18. R.-S. Huang, L.-M. Liu, and G. Song, "Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process", *Materials Science and Engineering: A*, 447(1-2), 239-243 (2007).
19. B. M. Lane, S. P. Moylan, E. P. Whinton, and L. Ma, "Thermographic measurements of the commercial laser powder bed fusion process at NIST", *Rapid prototyping journal*, 22(5), 778-787 (2016).
20. M. J. Ansari, D.-S. Nguyen, and H. S. Park, "Investigation of SLM process in terms of temperature distribution and melting pool size: Modeling and experimental approaches", *Materials*, 12(8), 1272 (2019).
21. J. Jeong, S. Webster, S. Liao, J.-E. Mogonye, K. Ehmman, and J. Cao, "Cooling rate measurement in directed energy deposition using photodiode-based planck thermometry (PDPT)", *Additive Manufacturing Letters*, 3, 100101 (2022).
22. M. Planck, "Über das gesetz der energieverteilung im normalspektrum", *annalen der physik*, 309(3), 553-563 (1978).
23. C. De Izarra and J.-M. Gitton, "Calibration and temperature profile of a tungsten filament lamp", *European Journal of Physics*, 31(4), 933 (2010).