

# 고융점 소재의 열 보조 가공에서 레이저-플라즈마 다중열원의 예열 효과에 대한 연구

이춘만\*<sup>#</sup>, 김성규\*

\*창원대학교 기계공학부, \*\*창원대학교 메카트로닉스공학부

## A Study on the Preheating Effect of Multi-Heat Sources using Laser Plasma in the Thermally Assisted Machining of a High-Melting-Point Material

Choon-Man Lee\*<sup>#</sup>, Seong-Gyu Kim\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, College of Mechatronics, Changwon National University,

\*\*Mechanical Design and Manufacturing, School of Mechatronics Engineering, Changwon National University

(Received 6 September 2019; received in revised form 14 September 2019; accepted 23 September 2019)

### ABSTRACT

Recently, with the development of the aerospace and automotive industries, the demand for high-melting-point materials has increased. However, high-melting-point materials are difficult to cut through conventional machining methods. Thermally assisted machining (TAM) is a method for improving the machinability by preheating the materials. A laser, the most commonly used device for TAM, has high efficiency through local preheating but is not sufficient for maintaining a high preheating temperature due to rapid cooling. However, the use of multi-heat sources can supplement the disadvantage of a single heat source. The high preheating temperature can be maintained with a wide and deep heat-affected zone (HAZ) by multi-heat sources. The purpose of this study is to analyze the preheating effects of multi-heat sources using laser plasma. Thermal analysis and preheating experiments were carried out. As a result, the high preheating effect of multi-heat sources compared with a single heat source was verified.

**Key Words** : High Melting Point Material(고융점소재), Thermally Assisted Machining(열 보조 가공), Multi-Heat Sources(다중열원), Laser-Plasma(레이저-플라즈마), Preheating Effect(예열 효과)

### 1. 서 론

오늘날 항공우주, 자동차 산업의 발전에 따라 니켈 합금, 티타늄합금과 같이 기계적 성질이 높은 고융점 소재에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한

고융점 소재는 우수한 고온 내열성과 내부식성을 바탕으로 항공 제트기관과 자동차 부품 등 내열을 요구하는 장치의 재료로 사용되고 있다. 하지만 고융점 소재는 우수한 기계적 성질로 인하여 전통적인 절삭가공 방법으로는 가공에 어려움이 있다<sup>[1-3]</sup>.

열 보조 가공(Thermally assisted machining, TAM)은 레이저, 플라즈마, 인덕션과 같은 열원에 의한 예열로 절삭 부위를 연화한 뒤 절삭 공구로 가공방

# Corresponding Author : cmlee@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3622, Fax: +82-55-267-1160

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.

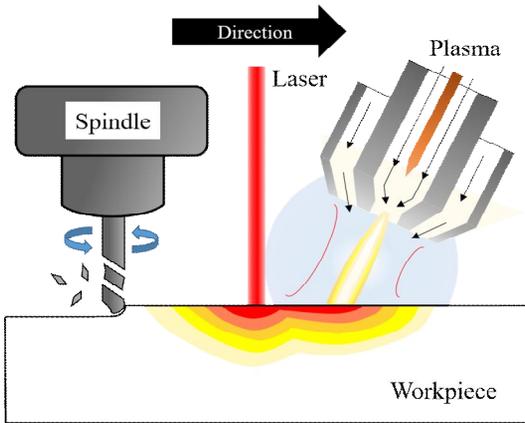


Fig. 1 The schematic diagram of TAM using the multi-heat sources

법이다. 연화된 소재를 가공하는 열 보조 가공 방법은 전통적인 가공 방법을 통해 가공품을 생산하는 것보다 절삭 효율과 표면 거칠기 측면에서 우수한 결과를 얻을 수 있다.

대표적인 열 보조 가공 방법 중 하나인 레이저 보조 가공(Laser assisted machining, LAM)은 레이저 열원의 국부적인 예열을 통해 높은 가공 효율을 가지는 방법이다. 난삭재의 수요증가와 함께 레이저 보조 가공에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

Wiedenmann등<sup>[4]</sup>은 해석과 실험을 통해 레이저 보조 밀링에서 절삭력과 공구마모의 감소를 분석하였고, 잠재적 경제성을 제시하였다. Bermingham등<sup>[5]</sup>은 레이저 보조 가공에서 회전에 따른 두 가지 예열방법에 대해 연구하였고, Ahn등<sup>[6]</sup>은 레이저 보조가공을 위해 움직이는 열원에 FEM (Finite Element Method)을 사용하여 열원분포를 해석하였다. Kim등<sup>[7]</sup>은 난삭재의 레이저 보조 가공에서 불엔드밀의 공구마모와 표면 거칠기를 분석하였고, Woo등<sup>[8]</sup>은 레이저 보조 밀링을 통해 실린더 형태의 AISI 1045와 Inconel 718의 가공 특성을 분석하여 레이저 열원의 우수성을 입증하였다.

그러나 레이저 단일열원은 급속가열 및 급속냉각에 의해 높은 예열온도를 유지하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 Fig. 1과 같이 추가적인 보조 열원을 통해 더 넓은 예열 범위와 지속적인 예열 효과를 얻음으로써 단일열원의 한계점을 보완할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 고융점 소재 중 하나인 Inconel 718 평판 시편에 대한 레이저-플라즈마 다중열원 열해석을 수행하여 예열 효과를 분석하고자 한다. 또한, 해석 결과를 바탕으로 실험 조건을 선정하고, 예열 실험을 통해 예열 효과를 비교분석하였다.

## 2. 다중열원 열해석

### 2.1 해석 이론

레이저-플라즈마 다중열원 열해석에 사용된 열전달 방정식과 경계조건은 각각 식(1)과 식(2)로 정의된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q(x, y) - h(T - T_0), \quad q = \frac{Q}{A} \text{ (W/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

식(1)에서  $T$ ,  $t$ ,  $k$ ,  $\rho$ ,  $C$ ,  $\dot{Q}$ 는 각각 온도, 시간, 열전도율(Thermal Conductivity), 밀도(Density), 비열(Specific Heat), 발열량(Heat Generation Rate)을 나타낸다.

식(2)에서  $q$ ,  $h$ 는 열 유속(Heat Flux), 열전달 계수(Heat Transfer Coefficient), 열전달 단면적(Heat Transfer Cross-section Area)를 나타낸다.

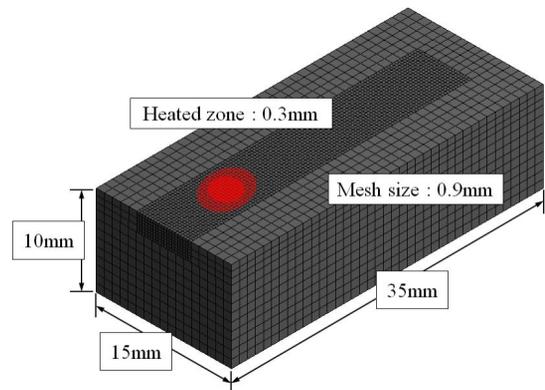


Fig. 2 FEM model

## 2.2 해석 모델

Fig. 2 는 해석에 사용한 유한요소 모델(Finite Element Model)을 나타낸다. 해석은 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, Moving heat source ACT를 사용한 Transient Thermal 해석 방법을 이용하였다. 소재는 Inconel 718을 사용하였으며, 시편의 크기는 15 mm × 10 mm × 35 mm(T×W×L)이다. 메쉬(Mesh)는 육면체 메쉬(Hexahedron)로 구성하였다. 시편 전체 메쉬 크기는 0.9 mm 로 구성하였으며, 해석의 신뢰성을 높이기 위해 열원 집중부는 0.3 mm로 설정하였다.

## 2.3 해석 조건

Table 1은 열해석 조건을 나타낸다. 초기온도는 22℃를 적용하였으며 레이저-플라즈마 다중열원에

Table 1 Analysis condition

Material	Inconel 718	
Heat source diameter (mm)	Laser	3
	Plasma	5
Plasma source power intensity (W/mm <sup>2</sup> )	30°	1.78
	45°	2.52
	60°	3.09
Convection coefficient (W/m <sup>2</sup> )	5	
Feed rate (mm/min)	100	
Density (kg/m <sup>3</sup> )	8190	

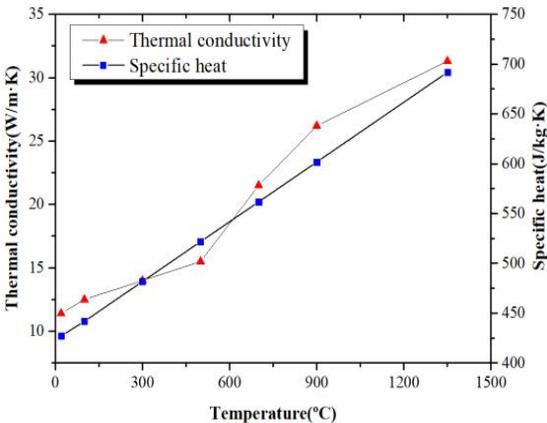


Fig. 3 The specific heat and thermal conductivity of Inconel 718

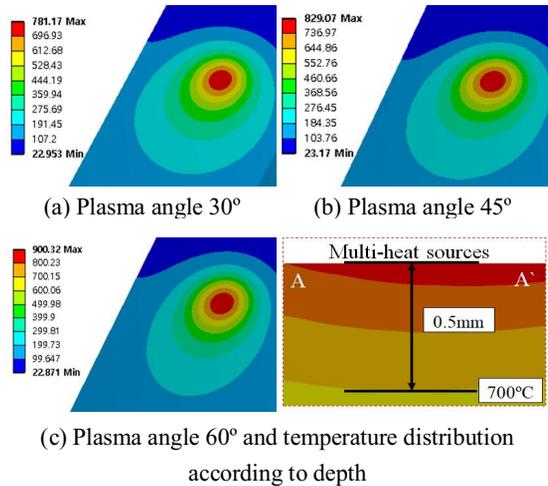


Fig. 4 Result of analysis

는 이동 열 유속(Moving Heat Flux)조건을 적용하였다. 레이저의 열원 직경은 3 mm, 플라즈마 열원의 직경은 5 mm로 설정하였다. 플라즈마 토치의 각도에 따른 플라즈마 열원의 단면적이 상이하므로, 단면적에 따른 전력 강도를 계산하여 각각 다르게 설정하였다. 또한 열해석에 필요한 물성치인 온도변화에 따른 열전도율과 비열은 Fig. 3에 나타내었다. 레이저-플라즈마의 열원 위치는 선행 연구를 바탕으로 가장 효율이 좋은 열원 중첩 방법을 적용하였다<sup>[9]</sup>.

## 2.4 해석결과

Inconel 718의 용융점은 약 1300℃이고, 인장강도는 700~900℃에서 크게 감소한다. 하지만 950℃ 이상에서는 재결정이 발생하므로, 시편 표면의 온도는 900℃, 열 보조 가공을 위한 최대 절삭 깊이까지의 온도는 700℃로 설정하였다. Fig. 4는 레이저-플라즈마 다중열원의 열해석 결과를 나타낸다. 해석 결과, 플라즈마 각도가 60° 일 때 예열 효과가 가장 우수하였고, 열 보조 가공을 위한 유효 절삭 깊이를 0.5 mm로 선정하였다.

## 3. 다중열원 예열 실험

### 3.1 실험 장비

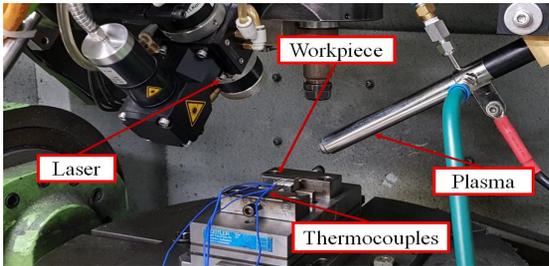


Fig. 5 Experimental set up for temperature measurement

Fig. 5는 레이저-플라즈마 예열실험에 사용된 장비를 나타낸다. 레이저는 940-980 nm의 파장과 1 kW의 출력을 가지는 다이오드 레이저인 Laserline의 LDM 1000-100을 사용하였다. 실시간 온도 측정을 위해 Dr.Mergenthaler GmbH & Co. KG의 고온계(Pyrometer)를 사용하였다. 플라즈마 토치는 PLASNIX의 비 이송형 토치를 사용하였다. 레이저 모듈과 플라즈마 토치 모두 별도의 칠러(Chiller)를 통해 고열로 인한 손상을 방지하였다. 열전대(Thermocouples) 데이터 기록 장치는 Graphtec의 GL-220을 사용하였다.

### 3.2 실험 방법

Table 2는 레이저-플라즈마 예열 실험조건을 나타낸다. 레이저-플라즈마 보조 가공을 위한 다중열원의 예열효과를 비교하기 위해 레이저 단일열원과 다중열원을 변수로 두었다. 레이저는 900°C, 플라즈마의 출력은 1 kW, 가스유량은 25 l/min로 설정하였다. Fig. 6은 실험에 사용한 Inconel 718 소재를 나타낸다. 깊이에 따른 예열 효과를 분석하기 위해 소재에 구멍을 내고 열전대를 삽입하여 온도를 측정하였다. 깊이는 열해석 결과를 바탕으로 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm로 선정하였다.

Table 2 Experimental condition

Plasma torch angle (°)	60
Laser temperature (°C)	900
Plasma power (kW)	1
Plasma gas flow rate (l/min)	25
Feed rate (mm/min)	100

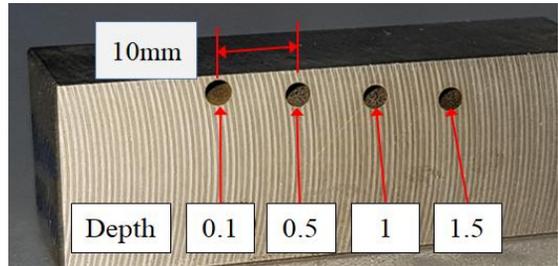


Fig. 6 Workpiece for temperature measurement

### 3.3 예열 효과 분석

본 연구에서는 Inconel 718 레이저-플라즈마 보조 가공에서 깊이에 따른 예열효과를 분석하고 레이저 단일열원과 비교하였다. 측정 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 실험을 3회 반복하였고 평균값을 산출하였다.

유한요소해석을 이용한 열해석과 레이저-플라즈마 다중열원의 예열 실험에서 측정된 최대온도의 오차율을 Fig. 7에 나타내었다. 오차율은 12.1%, 6.9%, 0.9% 및 8.5%로 열해석과 실험의 측정값이 유사하다는 것을 확인하였다. Fig. 8은 시간에 따른 예열 온도 분포를 나타낸다. 측정 결과, 0.1 mm 깊이에서 레이저-플라즈마 다중열원의 최대 예열 온도는 712°C 였고, 레이저 단일열원은 640°C로 다중열원이 단일열원에 비해 9.7% 더 높았다. 또한, 레이저-플라즈마 다중열원의 예열 온도는 레이저 단

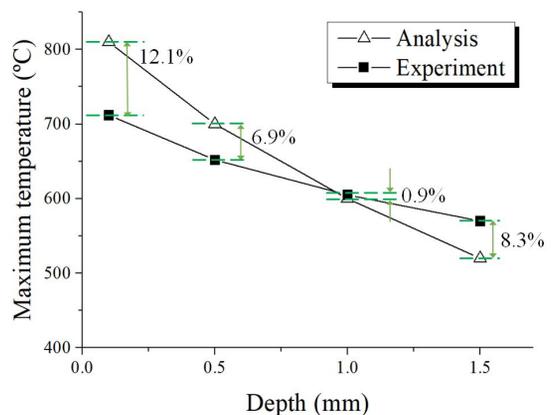


Fig. 7 The preheating temperature distribution according to time

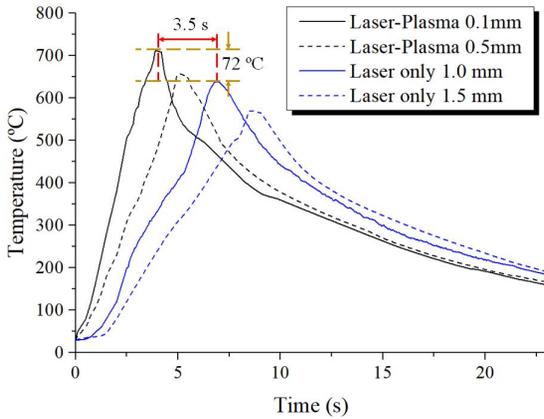


Fig. 8 The preheating temperature distribution according to time

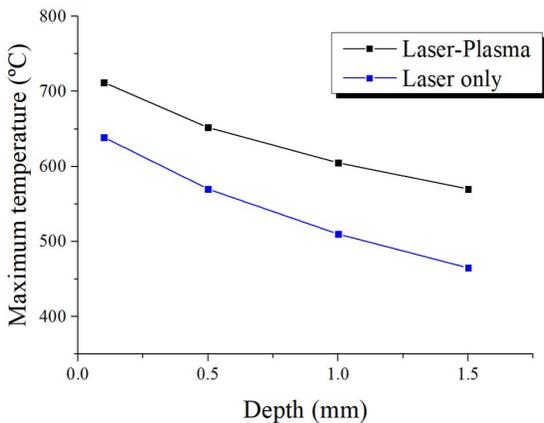


Fig. 9 The maximum temperature according to depth

일열원보다 3.5초 빨리 최대점에 도달했다. Fig. 9는 소재의 깊이에 따른 최대 온도를 나타낸다. 레이저-플라즈마는 0.1 mm에서 1.5 mm까지 최대 142°C 차이로 19.9%의 온도 감소가 나타난 반면, 레이저 단일열원은 174°C 차이로 27.2%의 온도 감소가 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Inconel 718 열 보조가공에서 레이저 단일열원대비 레이저-플라즈마 다중열원의 깊이

에 따른 예열효과를 해석 및 실험을 통해 확인하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 실험 조건 선정을 위한 열 해석 수행을 통해 플라즈마 각도는 60°, 열 보조 가공을 위한 유�효 절삭 깊이는 0.5 mm로 분석되었다.
2. 열해석과 예열실험 측정값의 소재 깊이에 따른 최대온도 오차율은 최대 12.1%로 나타났으며, 이를 통해 열해석 결과값과 다중열원 예열실험 측정값의 유사함을 확인하였다.
3. 레이저-플라즈마 다중열원의 최대 예열 온도는 레이저 단일열원보다 9.7% 더 높았고, 3.5초 빨리 도달하였다. 열 보조 가공 시 단일열원 대비 가공 진입 구간에서의 가공성 및 가공 특성을 향상 시킬 수 있다.
4. 레이저-플라즈마 다중열원은 0.1 mm에서 1.5 mm까지 19.9%의 온도 감소가 나타난 반면, 레이저 단일열원은 27.2%의 온도 감소가 나타나 7.3%의 차이를 보였다. 따라서 더 넓은 예열 범위와 지속적인 예열 효과를 얻음으로써 단일열원의 한계점을 보완할 수 있다.

본 연구는 Inconel 718 열 보조 가공을 위한 레이저-플라즈마의 예열효과 분석에 관한 연구이며, 레이저-플라즈마 보조가공의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

“이 논문은 2019-2020년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.”

#### REFERENCES

1. Kim, D. H., Jung, D. W. and Lee, C. M., "Study on Temperature Effect of Difficulty-to-Cut Material in Laser Heat Treatment Process," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 31, No. 1, pp. 29-33, 2014.
2. Jia, Q. and Gu, D., "Selective Laser Melting

- Additive Manufacturing of Inconel 718 Superalloy Parts: Densification, Microstructure and Properties,” *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 585, pp. 713-721, 2014. 629-634, 2015.
3. Lee, C. M., Woo, W. S., Kim, D. H., Oh, W. J., and Oh, N. S., “Laser-Assisted Hybrid Processes: A Review,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 2, pp. 257-267, 2016.4, pp. 239-255, 1998.
  4. Wiedenmann, R. and Zaeh, M. F., “Laser-Assisted Milling-Process Modeling and Experimental Validation,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 8, pp. 70-77, 2015.
  5. Bermingham, M., Schaffarzyk, P., Palanisamy, S., and Dargusch, M. S., “Laser-Assisted Milling Strategies with Different Cutting Tool Paths,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 74, No. 9, pp. 1487-1494, 2014.
  6. Ahn, S. H. and Lee, C. M., “A Study On Laser-Area Laser Processing Analysis in Consideration of the Moving Heat Source,” *International Journal Precision Engineering Manufacturing*, Vol. 12, No. 2, pp. 285-292, 2011.
  7. Kim, D. H. and Lee, C. M., “A study on the laser-assisted ball-end milling of difficult-to-cut materials using a new back-and-forth preheating method,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, pp. 1825-1834, 2015.
  8. Woo, W. S. and Lee, C. M., “A Study of the Machining Characteristics of AISI 1045 Steel and Inconel 718 with a Cylindrical Shape in Laser-Assisted Milling,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 91, pp. 33-42, 2015.
  9. Moon, S. H. and Lee, C. M., “An Analytical Study on the Preheating Effect of Flat Workpiece in Thermally Assisted Machining by Multi Heat Sources,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 33, No. 8, pp.