

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 X

# 레이저보조가공에서 열원과 공구 사이의 거리선정을 위한 해석적 연구

## Analytical Study of the Determination of Distance between the Laser Heat Source and Tool for Laser-Assisted Machining

백종태<sup>1,✉</sup>, 이춘만<sup>1,✉</sup>  
Jong-Tae Baek<sup>1</sup> and Choon-Man Lee<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National University)  
✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-215-3622

Manuscript received: 2015.6.18. / Revised: 2015.7.29. / Accepted: 2015.7.29.

*Laser-assisted machining has shown its potential to significantly improve product quality and reduce manufacturing costs; additionally, laser-assisted turning (LAT) and laser-assisted milling (LAM) have been studied by numerous researchers. A research study on the determination of the distance between the laser heat source and the tool for laser-assisted machining, however, has not yet been attempted; we conducted such an analysis by using a finite-element method and heat-transfer equation. The results of this analysis can be used as a reference for the determination of the distance between the laser heat source and the tool for laser-assisted machining.*

KEYWORDS: Laser assisted milling (레이저 보조밀링), Laser heat source (레이저 열원), Thermal analysis (열해석)

### 기호설명

$\rho$  = Density [kg/m<sup>3</sup>]  
 $T$  = Temperature [°C]  
 $k$  = Thermal conductivity [W/mm·°C]  
 $t$  = Time [sec]  
 $h$  = Convective heat transfer coefficient [W/mm<sup>2</sup>·°C]  
 $C_p$  = Specific heat [J/kg·°C]  
 $T_s$  = Surface temperature [°C]  
 $T_\infty$  = Ambient temperature [°C]  
 $V_L$  = Laser feed rate (mm/min)

$V_f$  = Tool feed rate (mm/min)  
 $P_L$  = Laser power (W)  
 $d_L$  = Heat source diameter (mm)  
 $y_L$  = The distance between laser beam and tool (mm)

### 1. 서론

레이저보조가공(Laser assisted machining)은 레이저를 이용하여 재료를 예열한 후 가공하는 방법으로써 제조 공정에서 높은 유연성과 양질의 생산품을 생산할 수 있다. 초기 투자 비용은 높지만 이를 이용하여

일반적인 가공방법으로는 가공이 불가능한 난삭재 가공에 적용하여 높은 효율을 얻을 수 있다.

다양한 산업 분야에서 난삭재를 사용한 제품의 수요 증가로 인해 난삭재 가공에 용이한 레이저보조가공에 관한 연구가 독일, 호주, 미국, 한국 등 여러 나라에서 활발하게 진행 중이다. 하지만 레이저보조밀링(Laser assisted milling: LAM)에 관한 연구는 초보단계에 머물러있다. 또한 LAM에서 레이저 열원과 공구 사이의 최적거리에 대한 연구가 미비하며, 이러한 연구가 필요하다.<sup>1-5</sup>

Kim 등<sup>1</sup> 은 LAM에서 Inconel 718과 AISI 1045 steel 의 레이저 예열과 절삭력을 분석하였다. Woo 등<sup>3</sup> 은 3차원 LAM을 위한 실린더형 시편의 예열 효과에 관한 연구를 하였다. Wiedenmann 등<sup>6</sup> 은 레이저 보조 밀링에서 공정모델링과 실험을 통해 레이저 열원의 효과와 공정의 잠재적인 경제가치, 공구마모 절감효과, 절삭력에 대해 언급하였다. Ahn 등<sup>7</sup> 은 레이저 보조가공을 위해 움직이는 열원에 FEM (Finite Element Method)을 사용하여 열원 분포를 해석하였다.

본 연구에서는 LAM에서 AISI 1045 steel, Inconel 718, Silicon nitride(질화규소)소재에 국부 열원해석을 통하여 레이저 열원과 공구 사이의 적정거리를 선정하였다.

## 2. 이론적 배경

레이저 예열에 대한 열전달 방정식은 식(1)과 식(2)와 같이 표현된다.<sup>7-9</sup>

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + q = 0 \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x_i} = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

열전달이 발생하는 경계면 혼합조건(Mixed condition)에 따라 고체표면 사이 대류 열전달에 의한 열전달 계수를 이용하여 식(2)를 사용하였다.

## 3. 유한요소 해석

### 3.1 해석모델

Fig. 1은 레이저 열원과 공구간의 거리에 대해서 나타내었다. 열원의 크기, 열원의 속도( $V_L$ ), 공

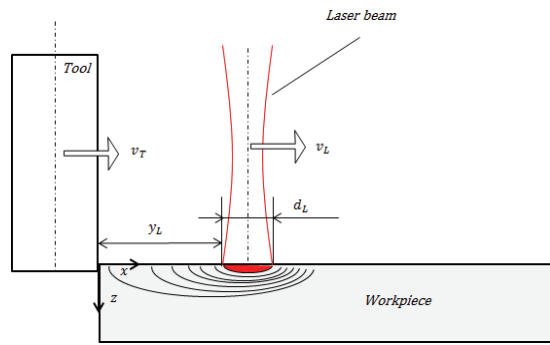


Fig. 1 The distance between laser beam and tool

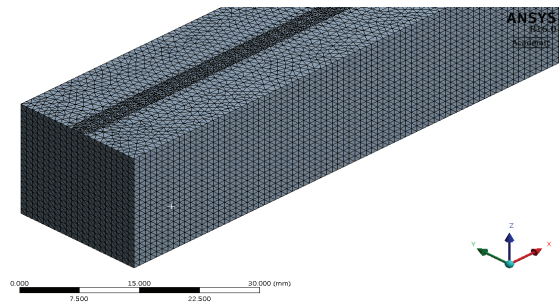


Fig. 2 Simulation model

Table 1 Analysis condition

Block size (mm)		100mm*20mm*20mm
Laser profile diameter (mm)		3mm
Laser feed rate (mm/min)		200mm/min
Laser power	AISI 1045steel	80W,100W,120W
	Inconel 718	80W,100W,120W
	Silicon nitride	100W,120W,140W
Convection coefficient		8W/m <sup>2</sup> °C
Thermal load type		Heat flow

구의 속도( $V_L$ ), 열원과 공구와의 거리( $y_L$ )를 도식화하였다. X축을 기준으로 하여 왼쪽에서 오른쪽으로 열원을 예열할 것이다.

Fig. 2는 열해석 Model을 나타낸 것이며, 본 연구의 열해석을 수행하기 위해 ANSYS를 사용하였다. 열원 이동에 따른 레이저 예열 부위의 정밀한 해석을 위해 예열 부위 Mesh의 크기를 1mm, 사각 표면에는 1.5mm로 설정하였다.

### 3.2 해석조건

열전도도(Thermal conductivity)와 비열(Specific heat)은 열 해석을 하기 위한 중요한 조건이기 때문에 Table 1과 Figs. 3과 4에 해석 조건을 나타내었다.

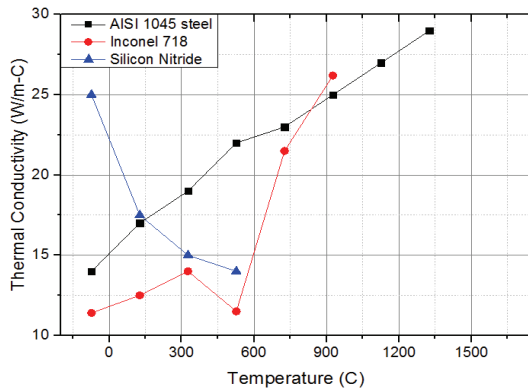


Fig. 3 Thermal conductivity according to temperature

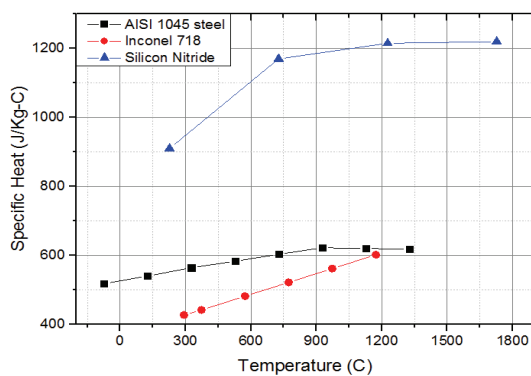


Fig. 4 Specific heat according to temperature

레이저 열원과 공구의 최적 거리를 선정하기 위해 레이저 예열 출력조건에 따라 사각 소재에 예열하는 과정을 해석하였다.

모든 해석은 Fig. 1에서 X방향으로 열원 이동에 따라 해석을 진행했다. 예열되는 열원 분포를 확인하기 위해 AISI 1045 steel의 변태 온도(Transformation temperature) 사이를 기준으로 레이저 출력(W)을 선택하였다.

AISI 1045 steel의 어닐링(Annealing) 온도는 550°C 이상이며, 730°C에서 상변화가 일어난다. 이러한 점을 고려하여 공구는 초경공구를 적용하였으며, 레이저의 출력을 80W, 100W, 120W로 하였다.<sup>10</sup>

Inconel 718은 용융 온도 범위가 1210 ~ 1344°C이며, 재결정 과정 없이 잔류응력을 감소시킬 수 있는 온도 범위는 524~870°C이다. 따라서 난삭재의 높은 경도를 고려하여 CBN(Cubic boron nitride) 공구를 선정하였고, 적정 예열 온도 850°C를 기준으로 하여 120W, 140W, 160W로 선정하였다.<sup>11,12</sup>

난삭재인 질화규소는 온도 YSiAlON의 유리전 의온도(Glass transition temperature)인 920~970°C를 초과 하게 되면YSiAlON Glass의 점성(Viscosity)유 등으로 질화규소 입자 사이에서 봉(Rod)형상의 입자 는 슬립(Slip)이 발생되어 칩의 유동방향으로 재배열이 되지만, 입자 자체의 변형은 발생하지 않는다. 이러한 강체(Rid body) 거동을 하는 입자들로 인해 실제 CBN 인서트의 플랭크면과 가공면 사이에서 높은 접촉력이 발생한다. 따라서 온도 증가로 인해 YSiAlON Glass 점성이 감소하게 되어 질화규소 입자의 재배열이 활발하게 발생하게 되고 절삭 분력의 비율이 감소한다.<sup>13-16</sup>

이러한 점을 고려하여 공구는 CBN으로 정하였으며, 예열 온도는 대략 1300°C를 기준으로 하여 140W, 160W, 180W로 하여 분석하였다.

### 3.3 해석결과

Figs. 5-7에는 레이저 출력에 따라 레이저 열원과 공구 사이 적정거리를 구하기 위한 해석 결과를 보여준다. 열원으로부터 1.5mm씩 11개의 구간을 나누어 온도를 구하였다.

Table 2에는 각각의 소재에 따른 레이저 출력변화를 열원 중앙에서 공구까지 최소거리(Minimum distance) 1.5mm, 중간거리(Middle distance) 7.5mm 및 최대거리(Maximum distance) 13.5mm에서의 온도를 Table 2에 나타내었다.

Fig. 8의 AISI 1045 steel에서 80W, 100W, 120W 레이저 열원과 공구 사이의 거리 1.5~3mm에서 온도가 60% 이상 감소 하는 것을 확인할 수 있다. AISI 1045 steel의 경우 레이저 출력 80W, 최소거리에서 온도는 515.49°C이며, 중간거리 온도는 111.23°C, 최대거리에서는 76.35°C로 분석되었다. 레이저출력 100W인 경우 최소거리에서 온도는 616.86°C, 중간거리 온도는 119.9°C, 최대거리에서는 84.81°C로 분석되었다. 레이저 출력이 120W인 경우 최소거리 온도는 821.68°C로 가장 높게 나왔으며, 중간거리 온도는 142.79°C, 최대거리 온도는 99.3°C으로 분석되었다. 이 경우 최소거리 온도가 너무 높아 상변태가 발생하므로 100W 이하 출력을 유지하는 것이 좋다.

100W 레이저 열원과 공구의 거리를 최대 1.5mm로 유지하면, 공구에 가해지는 열이 최소화 되고 소재에 가해지는 고밀도 에너지를 극대화해 AISI 1045 steel 가공을 용이하게 한다.

Fig. 9의 Inconel 718에서 120W, 140W, 160W 레이저 열원과 공구 사이의 거리 4.5~6mm에서 온도

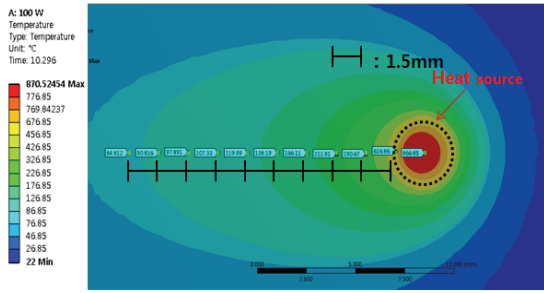


Fig. 5 Analysis result of 100W (AISI 1045 steel)

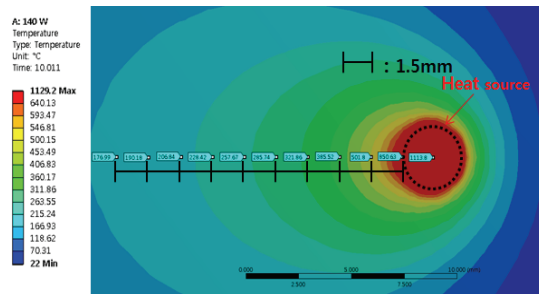


Fig. 6 Analysis result of 140W (Inconel 718)

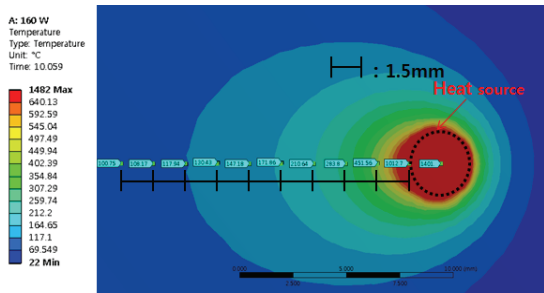


Fig. 7 Analysis result of 160W (Silicon nitride)

가 60% 이상 감소하는 것으로 확인했다. 레이저 출력이 증가함에 따라 소재표면 온도가 상승되어 용융 온도에 도달하게 된다. 하지만 Inconel 718은 재결정과정 없이 잔류응력 감소 되는 구간인 524 ~ 870°C를 거쳐 곧 바로 용융점에 도달한다. 이러한 점을 고려하여, 레이저 열원과 공구 사이 거리를 최소 1.5mm, 최대 2.6mm 로 설정하는 것이 Inconel 718 소재의 열원과 공구 적정 거리로 판단된다.

Fig. 10에는 질화규소의 140W, 160W, 180W 레이저 열원에 의한 열원과 공구 사이의 거리에 따른 온도 분포를 보여준다. 160W 이상의 열원을 사용하는 것이 추천되며, 열원과 공구 사이의 거리 0~2mm 사이에서 온도가 60% 이상 감소하는 것을

Table 2 Temperature according to power

	Laser power (W)	Temp.at Min. distance (°C)	Temp. at Mid. distance (°C)	Temp.at Max. distance (°C)
AISI 1045 steel	80	278.65	111.23	76.355
	100	209.67	119.99	84.81
	120	325.79	142.79	99.32
Inconel 718	120	450.99	225.93	151.55
	140	501.8	257.67	176.99
	160	562.89	278.76	197.7
Silicon nitride	140	376.92	129.76	90.39
	160	451.56	147.18	100.75
	180	557.07	164.28	111.01

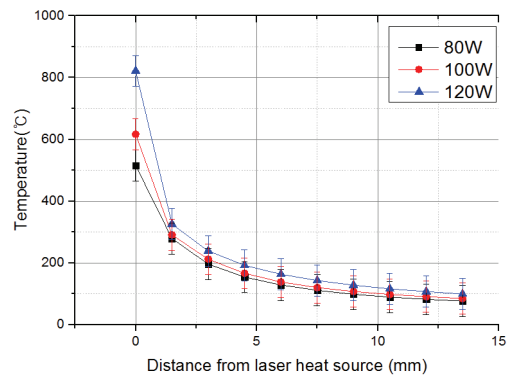


Fig. 8 Temperature according to distance from laser heat source and power (AISI 1045 steel)

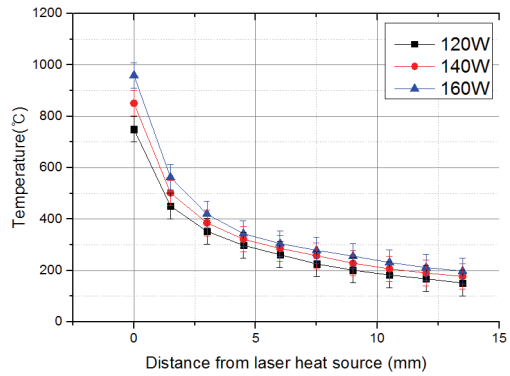


Fig. 9 Temperature according to distance from laser heat source and power (Inconel 718)

확인하였다. 질화규소는 열전도율이 높아 레이저로 예열된 온도가 급격히 냉각되었다. 레이저 열원과 공구 사이의 거리가 2mm 이상 떨어지게 되

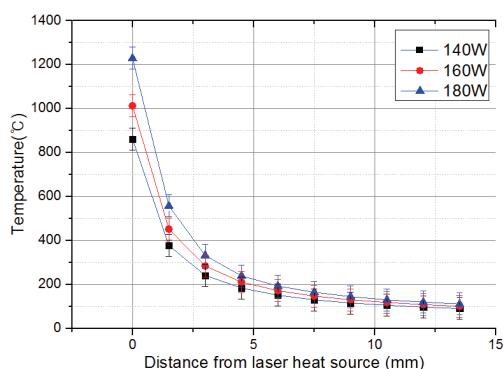


Fig. 10 Temperature according to distance from laser heat source and power (silicon nitride)

면 레이저예열 온도는 70% 이하로 감소하는 결과를 얻었으며, 가공 시에는 1000°C 이상의 예열 온도를 유지해야 하고 공구 특성, 소재의 열전도율을 고려하여 최대 1.5mm 지점이 열원과 공구의 적정 거리로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 LAM 가공에서 레이저 열원과 공구간 거리 선정을 위해 소재를 예열하고 냉각되는 과정을 유한요소해석 하였고 열원과 공구간의 거리에 따른 온도 분포를 분석하였다.

사용된 재료는 AISI 1045 steel, Inconel 718 및 질화규소이며 가공 시 공구에 그을림(burning) 현상을 방지하고, 공구 수명을 향상할 수 있는 온도분포와 온도감소율을 고려하여 레이저 열원과 공구 사이의 적정 거리를 선정 하였다. 본 연구를 통해 아래와 같은 결과를 도출 하였다.

(1) AISI 1045 steel 의 경우 100W 이하의 열원을 사용하는 것이 추천되며 레이저 열원과 공구 사이의 거리 1.5~3mm 사이에서 온도가 60% 이상 감소하였으며, 레이저 열원 80W, 100W, 120W 에서 따른 최소거리, 중간거리, 최대거리에 대한 분석을 진행 하였다. 100W 레이저 열원과 공구 사이의 거리를 최대 1.5mm로 유지하면, 공구에 가해지는 열이 최소화되고 소재에 가해지는 고밀도 에너지를 극대화해 가공을 용이하게 한다. 열원을 120W로 하여 가공을 하게 된다면 소재에 상변태가 발생할 수 있으며, 공구에 손상될 우려가 있다.

(2) Inconel 718의 경우 해석 레이저 열원과 공구 사이의 거리 4.5~6mm 사이에서 온도가 60%이

상 감소한다. 레이저 출력이 증가함에 따라 재결정 과정 없이 잔류 응력이 감소되는 구간인 524~870°C를 거쳐 곧바로 용융점에 도달한다. 적정 예열 온도 850°C를 기준으로 하였으며, 이 점을 고려하여, 120W 레이저 열원과 공구 사이 거리를 최소 1.5mm, 최대 2.6mm로 설정하는 것이 레이저 예열효과를 극대화 할 것이며, 열원과 공구 사이 적정거리로 판단된다. 140W 레이저 열원 가공 시 열원중앙부에서 용융 온도 1210 ~ 1344°C에 근접하게 되어 소재와 공구에 열로 인해서 손상을 입게 된다.

(3) 질화규소의 경우 160W 열원을 사용하는 것이 추천되며, 다른 소재보다 열전도율이 높아 레이저로 예열된 온도가 급격하게 냉각되었다. 레이저 열원과 공구 사이의 거리가 2mm 이상이 되면 레이저 예열 온도는 70% 이하로 감소하는 결과를 얻었다. 질화규소 가공 시 1000°C 이상의 예열 온도와, 공구 특성, 소재의 열전도율을 고려하여 최대 1.5mm 지점이 열원과 공구의 적정 거리로 판단되며, 180W의 열원 가공 시 입자 변형에 대한 문제점은 발생하지는 않지만, 공구에 가해지는 열로 인해서 공구손상과 공구 그을림(Burning)이 발생 할 것으로 예측된다.

본 연구의 결과는 LAM에서 열원과 공구의 적정거리 선정을 위한 연구이며, 본 연구의 방법을 이용하여 다양한 시편과 형상에 대해 적정 거리를 결정할 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(No.2015021823).

#### REFERENCES

- Kim, D.-H. and Lee, C.-M., "A Study of Cutting Force and Preheating-Temperature Prediction for Laser-Assisted Milling of Inconel 718 and AISI 1045 Steel," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 71, pp. 264-274, 2014.
- Orazi, L., Fortunato, A., Cuccolini, G., and Tani, G., "An Efficient Model for Laser Surface Hardening of Hypo-Eutectoid Steels," Applied Surface Science, Vol. 256, No. 6, pp. 1913-1919, 2010.

3. Woo, W. S. and Lee, C. M., "An Analytical Study on the Preheating Effect of Workpiece with Cylindrical Shape for 3-Dimensional Laser-Assisted Milling," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 32, No. 2, pp. 173-178, 2015.
4. Baek, J. T. and Lee, C. M., "A Basic Study on the Optimum Distance between the Laser Heat Source and Tool-Path in Laser-Assisted Milling," *Proc. of KSPE Spring Conference*, p. 690, 2015.
5. Birmingham, M., Kent, D., and Dargusch, M., "A New Understanding of the Wear Processes during Laser Assisted Milling 17-4 Precipitation Hardened Stainless Steel," *Wear*, Vol. 328, pp. 518-530, 2015.
6. 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.
7. Ahn, S. W. and Lee, C. M., "A Study On Laser-Area Laser Processing Analysis in Consideration of the Moving Heat Source," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 12, No. 2, pp. 285-292, 2011.
8. Kim, G. S. and Lee, C. M., "Analysis of Moving Heat Source for Laser Assisted Machining of Plate by Feed Rate Control," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 28, No. 12, pp. 1341-1346, 2011.
9. Pabst, R., Fleischer, J., and Michna, J., "Modelling of the Heat Input for Face-Milling Processes," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 121-124, 2010.
10. Kim, K. S., Choi, J. H., and Lee, C. M., "A Basic Study on the Prediction of Preheating Effect SM45C by Using HPDL," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 143-144, 2012.
11. Hwang, S. J., Kang, D. W., and Lee, C. M., "A Basic Study on the Absorptivity for the Laser Power of Inconel 718," *Proc. of the KSMPE Autumn Conference*, p. 153, 2013.
12. Kang, D. W. and Lee, C. M., "A Study on the Cutting Analysis of Inconel-718 by Laser-Assisted Milling," *Proc. of the KSMPE Spring Conference*, p. 82, 2013.
13. Lei, S., Shin, Y. C., and Incropera, F. P., "Deformation Mechanisms and Constitutive Modeling for Silicon Nitride Undergoing Laser-Assisted Machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No. 15, pp. 2213-2233, 2000.
14. Lim, S. W., Lee, J. H., Shin, D. S., Kim, J. H., and Kim, J. H., "A Study on Laser-Assisted Machining Process of Silicon Nitride," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 26, No. 5, pp. 48-56, 2009.
15. Choi, W. S., "Assessment of Cutting Ability for CBN Ball End-Milling," *Journal of Korean Society of Industrial Application*, Vol. 8, No. 4, pp. 227-237, 2005.
16. Kim, T.-W. and Lee, C.-M., "A Study on the Development of Milling Process for Silicon Nitride Using Ball End-Mill Tools by Laser-Assisted Machining," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 77, No. 5-8, pp. 1205-1211, 2015.