

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 XII

레이저보조가공에서 NURBS 곡면 형상의 예열방법에 대한 연구

Study on the Preheating Method of NURBS Shaped Workpiece by Laser Assisted Machining

김은중¹, 이춘만^{1,✉}
Eun-Jung Kim¹ and Choon-Man Lee^{1,✉}

¹ 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National University)
✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3622

Manuscript received: 2016.1.5. / Revised: 2015.1.27. / Accepted: 2015.1.28.

Laser-Assisted machining (LAM) is a new method for processing hard-to-cut materials. However, curved shapes are difficult to predict the preheating effect of by LAM because heat sources are changed by moving laser module. So, it is necessary to study the preheating effect of the laser heat source irradiated on a 3-dimensionally shaped workpiece, such as a NURBS shaped workpiece. In this study, thermal analysis and preheating experiment of the LAM for the NURBS shaped workpiece are performed. Also, two machining methods are proposed to avoid interference of laser module and cutting tool. The results of the analysis can be applied to various shaped workpieces by LAM.

KEYWORDS: Laser assisted machining (레이저 보조 가공), NURBS curve (비균일 유리 B-스플라인 곡선), Thermal analysis (열해석)

1. 서론

레이저보조가공(LAM, Laser Assisted Machining)은 가공이 힘든 난삭재를 가공하기 위해 고안된 방법 중 하나이다.^{1,2} 난삭재는 티타늄계열의 합금이나 니켈계열의 합금을 주로 말한다. 이 소재들은 고온에서 경도가 높고 내열성이 높으며 비강도가 높다. 그러한 이유로 높은 온도를 견뎌야 하는 엔진이나 극한의 작업환경을 가지는 여러 분야의 소재로 각광받고 있다. 하지만 이러한 난삭재는 강도가 높아 절삭성이 매우 떨어진다. 레이저보조

가공은 이러한 난삭재에 레이저를 조사, 예열함으로써 경도를 낮추어 소재를 연하게 만들어 가공성을 높이는 방법이다.

Bermingham³은 레이저보조가공에서 복잡한 형상의 제품을 가공하기 위한 공구경로(Tool-path)에 대한 연구를 하였고, Oh⁴은 레이저 렌즈 교환 장치의 정밀도 평가에 대한 연구를 통하여 레이저 렌즈의 교환 장치에 대한 구조적인 안정성을 검증하였다.

Kang⁵ 해석과 실험을 통해 레이저보조가공에서 구성방정식의 요소를 검증하였으며 Sim⁶ 경

사각이 있는 시편의 예열효과를 열해석과 실험을 통해 비교하였다. Woo는⁷ 실린더 형상의 시편에서 레이저 열원의 조사 각도 및 적정 예열온도에 대한 해석적 연구를 하였다.

NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 곡선은 3차원 형상을 표현하는 방법 중의 하나이다. 다른 표현 방법에 비해 복잡한 3차원의 자유곡선이나 곡면을 정확하게 표현가능하며, 편집이 용이하고 특정한 형상을 표현하기 위한 계산의 양이 적다. 이러한 정밀성과 유연성으로 곡선의 활용이 필요한 자동차산업이나, 조선산업, 항공산업 등의 곡선 표현에 사용되고 있다. Song등⁸은 NURBS 제어점의 위치 및 가중치를 설계변수로 하여 형상최적설계에 대한 연구를 하였다.

최근 국내외에서 레이저보조가공에서 다양한 형상의 가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 고차원적이고 다양한 축의 동시제어를 활용한 가공을 하기 위해서는 곡선형상에 대한 예열 효과 분석과 가공방법을 개발하여야 한다.

본 연구는 여러 가지 곡선의 표현 방법 중에서 현재 여러 산업분야와 CAD/CAM 프로그램에서 활용되고 있는 NURBS 곡선을 돌출(Extrusion)하여 생성된 2.5차원 형상의 시편을 레이저보조가공을 활용하여 가공하기 위한 연구를 수행하였다. 또한, 적절한 예열온도를 얻기 위한 열해석과 예열실험을 수행하였으며 적당한 예열방법을 제시하였다.

2. NURBS 곡선

2.1 NURBS 곡선의 정의

Fig. 1은 NURBS 곡선을 나타낸다. NURBS 곡선의 기본적인 형태는 B-스플라인(B-Spline)의 기본적인 형태와 같으며 B-스플라인에서 가중치(Weights)가 추가된 형태이다. 일반적으로 m개의 단위 구간을 갖는 n차 NURBS 곡선은 조정점(Control Points) b_i 와 가중치(Weights) ω_i , 그리고 매듭벡터(Knot vector) δ_i 에 의해 결정되며 수식(1)에 의해 정의된다. m개의 단위구간을 가지는 3차 NURBS 곡선은 (m+3)개의 조정점과 (m+3)개의 가중치, (m+4)개의 매듭벡터를 가진다. 여기서 B_i 는 B-스플라인의 기저 함수이다.^{8,9} 여기서 가중치의 역할은 곡선을 조정점 쪽으로 당겨 곡선을 변화시키는 역할을 한다.

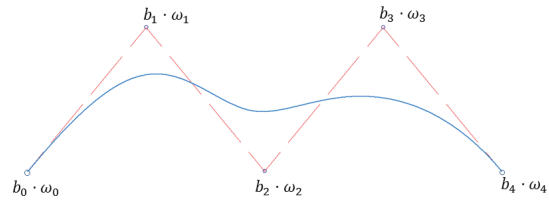


Fig. 1 NURBS curve

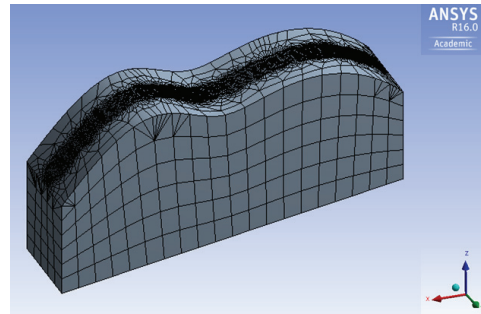


Fig. 2 Shape of the workpiece

$$r(u) = \frac{\sum_{i=0}^n B_i(u)\omega_i b_i}{\sum_{i=0}^n B_i(u)\omega_i} \quad (1)$$

본 연구에서는 ω_1, ω_2 의 가중치가 2이고 나머지 가중치는 모두 1인 3차 NURBS 곡선의 형상인 시편을 사용하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석 모델

Fig. 2는 본 연구에 사용된 NURBS 곡면을 기반으로 생성된 해석모델이다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 상용해석 소프트웨어인 Ansys Workbench를 사용하여 진행하였다. 해석 모델은 가공 시 공구의 간섭으로 인한 언더 컷(undercut)이나 기타 간섭을 방지하기 위해 충분히 긴 형상으로 진행하였다.

해석에서 사용된 메쉬(Mesh)는 육면체 메쉬(Hex dominant mesh)를 사용하였고 크기는 3mm로 하였다. 열원이 지나가는 부분은 메쉬 크기를 0.3mm로 조밀하게 하여 해석의 정확도를 높이고자 하였다. 열원이 움직이는 방식은 시간에 따라서 곡면을 타고 진행되는 방식으로 하였다. 해석 모델에서 노드(nodes)의 개수는 99,941개이며 요소(elements)의 개수는 31,984개 이다.

3.2 해석 조건

해석에서 사용된 소재는 AISI 1045와 Inconel718 이다. Figs. 3과 4는 각각 AISI 1045와 Inconel718의 열전도율(Thermal Conductivity)을 나타내며 Figs. 5와 6은 AISI 1045와 Inconel718의 비열(Specific heat)을 나타낸다.

적정예열 온도 범위를 찾기 위해 AISI 1045 는 70W, 90W, 110W의 3가지 레이저 출력으로 진행하였다. Inconel718은 110W, 130W, 150W로 진행하였다. Inconel718이 출력이 높은 이유는 상(Phase)이 변하는 온도가 더 높기 때문이다.

레이저 열원의 크기는 3 mm이며 총 32개의 열원형상을 사용하여 각각의 열원에 1초씩 예열하며 앞으로 진행되는 방식으로 32 step으로 진행하였다. 해석은 온도 의존성을 가지는 비선형 열전달 (Nonlinear heat transfer)이며, 초기 온도는 22 °C, 열전달 방식은 강제대류(Enforced convection) 조건을 적용하였다. 열전달이 없는 측면이나 바닥면은 단열조건을 적용하였다. 또한 측면의 고정온도는 22 °C로 적용하였다. 열원이 조사되는 방법으로는 열 흐름(Heat flow) 조건을 이용하였다. 자세한 해석조건은 Table 1에 나타내었다.

레이저 열원의 적정 예열온도는 AISI 1045에서는 상(Phase)의 변화가 발생하는 A1 변태점(726 °C) 직전의 출력을 찾기 위해 진행하였으며, Inconel718은 상 변화가 있는 고상선(1260 °C) 직전의 출력을 찾기 위해 해석을 진행하였다.

3.3 해석 결과

해석 결과 3가지의 출력 변화에 따른 소재의 최대 온도의 분포를 Table 2에 나타내었다.

Figs. 7과 8은 각각 AISI 1045와 Inconel718에 대해 열 해석을 하였을 때 시간에 따른 온도 분포를 시편의 형상과 비교하여 나타내었다. 높이가 가장 높은 부분의 근처에서 최대온도가 나타났으며 오목(Concave)한 부분과 끝부분의 가장 낮은 높이에서 최저온도가 나타났다. 이는 출력에 상관없이 시편의 형상과 유사한 형태의 온도분포를 보여주고 있다.

Fig. 9(a)는 AISI 1045에서 70W 레이저 출력에 의한 해석을 수행하였을 때 발생한 최대 온도는 614.92 °C를 나타내었다. Fig. 9(b)는 90W 출력에 의한 최대 온도 754.46 °C를 나타내었으며, Fig. 9(c)는 110W 출력에 의한 최대 온도 883.34 °C를 나타내었다.

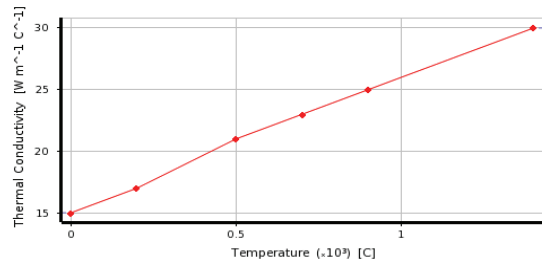


Fig. 3 Thermal conductivity of AISI 1045

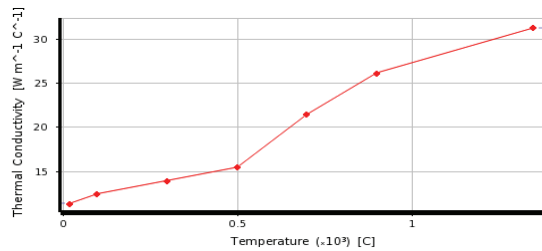


Fig. 4 Thermal conductivity of Inconel718

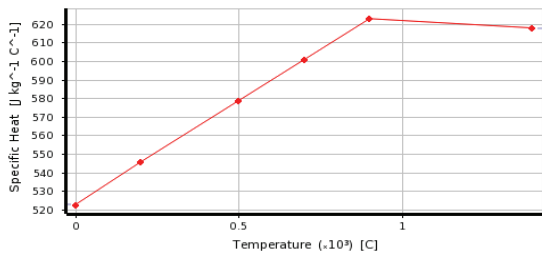


Fig. 5 Specific heat of AISI 1045

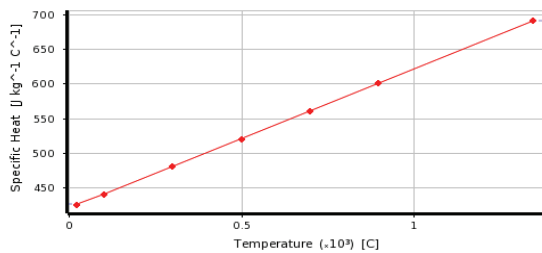


Fig. 6 Specific heat of Inconel718

Table 1 Thermal analysis condition

Material		AISI 1045, Inconel718
Laser heat source size		3 mm
Laser power	AISI 1045	70, 90, 110 W/m ²
	Inconel718	110, 130, 150 W/m ²
Convection		8 W/mm ² °C
Thermal load type		Heat flow

Table 2 Maximum and minimum temperature according to laser power

	LaserPower (W/m ²)	Max. Temperature (°C)
AISI 1045	70	614.92
	90	754.46
	110	883.24
Inconel718	110	987.56
	130	1100.90
	150	1208.90

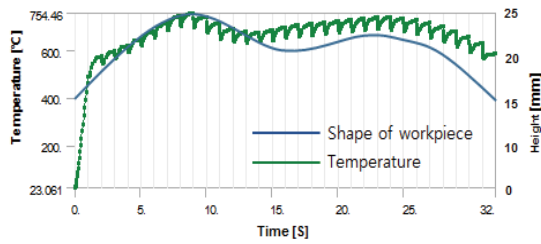


Fig. 7 Distribution temperature of AISI 1045 according to time

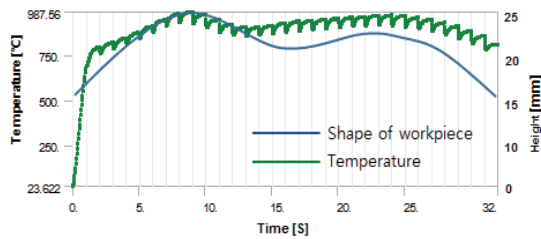
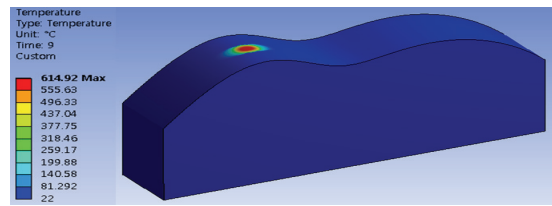


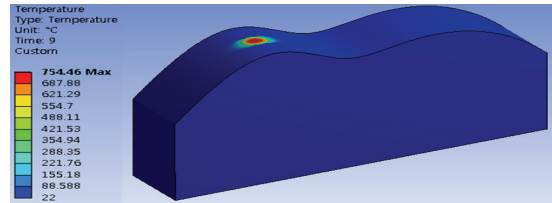
Fig. 8 Distribution temperature of Inconel718 according to time

Fig. 10(a)는 Inconel718에서 110W 레이저 출력에 의한 해석을 수행하였을 때 발생한 최대 온도 986.98 °C를 나타내었다. Fig. 10(b)는 130W 출력에 의한 최대 온도 1100.9 °C를 나타내었으며, Fig. 10(c)는 150W 출력에 의한 최대 온도 1208.4 °C를 나타내었다.

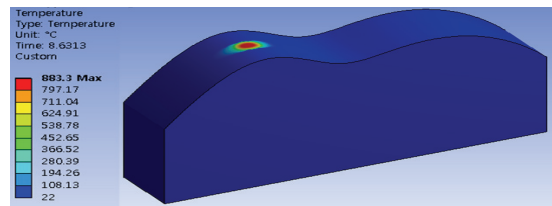
해석결과 AISI 1045는 90W의 출력에서 A1 변태점(726 °C)에 근접한 온도 754.46 °C를 얻을 수 있었다. Inconel718은 150W 근처의 출력에서 고상선(1260 °C)에 근접한 온도 1208.4 °C를 얻을 수 있었으므로 AISI 1045는 90W 근처에서, Inconel718은 150W 근처에서 적정 예열온도를 얻을 수 있었다.



(a) AISI 1045 in 70W

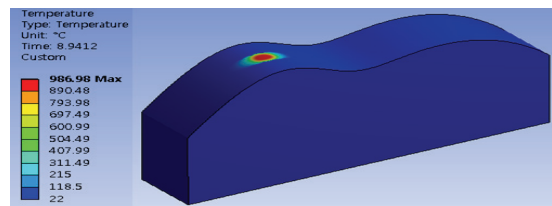


(b) AISI 1045 in 90W

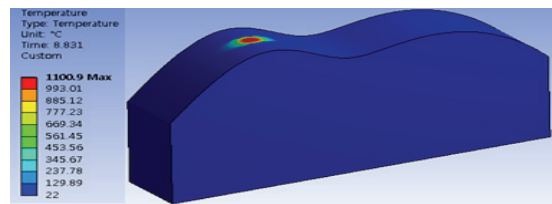


(c) AISI 1045 in 110W

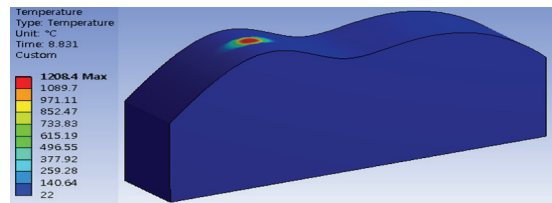
Fig. 9 Analysis result of AISI 1045



(a) Inconel718 in 110W



(b) Inconel718 in 130W



(c) Inconel718 in 150W

Fig. 10 Analysis result of Inconel718

4. 예열 실험

예열실험을 통한 실험결과와 해석결과의 비교를 통해 예열 효과를 검증하였다. 레이저장치의 구조적인 한계로 인해 볼록한 부분에서 오목한 부분으로 변하는 위치에서는 레이저의 간섭발생 등 예열이 원활히 이루어지지 않는 문제가 있다. 이러한 점을 해결하기 위해 가공 시 볼록한 부분에서 오목한 부분으로 변하는 위치에서는 인덱스 테이블(index table)의 회전과 레이저모듈의 이송을 이용한 턴밀(Turn-Mill)과 5축 제어를 이용하는 다축 제어(Multi-axis control)를 이용한 가공방법을 적용하여 해결 할 수 있다.

턴밀(Turn-Mill)에 의한 방법은 형상변화가 이루어 지는 부분에서 테이블의 A축이 회전과 레이저 모듈의 UV축이 이송하여 Zig-Zag 방식의 공구 경로를 가지는 가공방법이다.

Fig. 11 턴밀에 의한 예열방법을 보여준다.¹⁰⁻¹³ 다만 턴밀을 이용한 방법은 Zig-Zag 경로를 이용한 방법으로 상향절삭과 하향절삭이 반복적으로 이루어 지기에 균일한 표면 거칠기를 얻기는 어려울 것으로 판단된다. 그러므로 균일한 표면 거칠기를 가지기 위해 절삭속도의 변화에 따른 표면 거칠기에 대한 연구가 필요하다.

다축 제어에 의한 방법은 5축가공의 한 방법으로 공구의 끝점이 가공면에 항상 수직하도록 가공 경로를 만드는 방법이다. 다축 제어를 이용한 방법은 균일한 표면 거칠기를 얻을 수 있지만 5축가공의 특성상 3D 모델의 품질에 따라 추출되는 NC 코드의 차이로 인한 가공성 차이가 발생한다. 또한 공구와 시편의 간섭과 기계와의 간섭이 발생할 수 있으므로 간섭 확인이 필수적이다. Fig. 12는 다축 제어를 이용하였을 때 공구가 움직이는 가공 경로를 보여준다.¹⁴

Fig. 13은 예열실험을 하기 위한 장치를 나타내었다. 실험에 사용된 재료는 AISI 1045이다. 실험은 제시된 방법 중 턴밀에 의한 방법으로 적용하였다. 턴밀에서 인덱스 테이블이 회전 할 때 레이저모듈의 부가축인 U축이 이송하여 레이저 열원의 위치를 이동하였다.

온도측정은 레이저 모듈에 장착되어 있는 고온계(Pyrometer)로 측정하였으며, Table 3은 해석결과와 실험결과의 비교를 보여준다. 출력이 70W일 때의 오차는 7.43 %이다. 출력이 90W일 때의 오차는 7.19 %이며, 110W일 때의 오차는 8.78 %이다. 실험

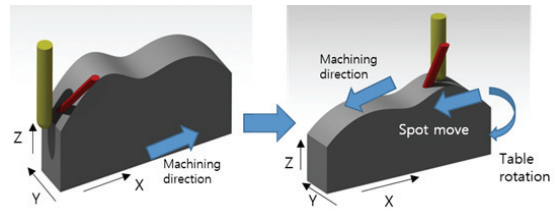


Fig. 11 Preheating method by turn-mill

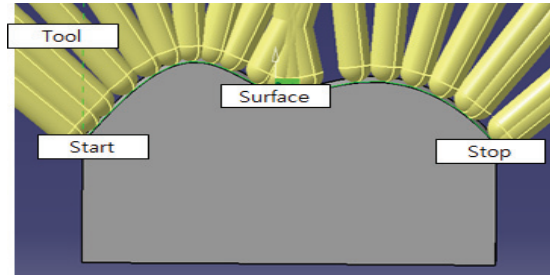


Fig. 12 Multi-Axis control machining

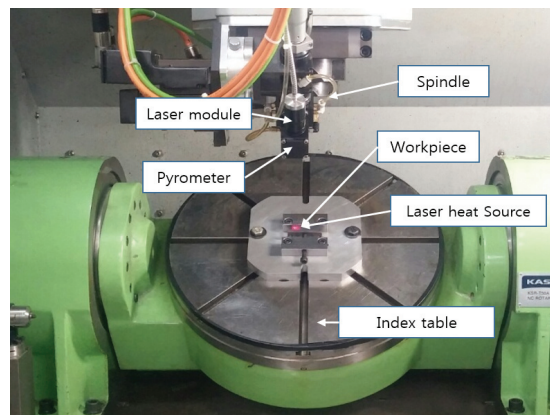


Fig. 13 Experimental set-up for preheat test

Table 3 Comparison of the results between the analysis and the experiment

	70W	90W	110W
Max. Temp (Analysis)	614.92 °C	754.46 °C	883.24 °C
Max. Temp (Experiment)	569.2 °C	700.19 °C	805.66 °C
Error	7.43%	7.19%	8.78%

에서 온도가 더 낮은 이유는 여러 가지 실험오차와 레이저의 최적거리에 따른 레이저 열원 형상의 변화가 원인으로 판단된다. 또한 턴밀에서 테이블이 회전 하거나 레이저가 이송 할 때 레이저에 의

한 실험 장치의 손상이 발생 할 수 있으므로 레이저를 끄고 이송을 하였으며, 이런 이유로 예열효과가 떨어진 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 여러 산업분야에서 널리 활용되고 있는 NURBS 곡면 형상을 가지는 시편을 이용해 레이저보조가공에서의 예열에 대한 해석을 진행하고 실험을 통한 예열효과와 예열방법을 제시하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존의 3축가공에서 나아가 5축가공에 적용 할 수 있는 NURBS 곡선 형태를 가지는 시편에 대해 출력에 따른 온도분포를 유한요소해석을 통해 확인하였다.

(2) 최대 온도와 최소 온도의 발생이 불룩한 부분과 곡면 가장 아래 부분이라는 점을 확인하였다. 이는 불룩한 부분에서는 열원의 모양이 완전한 원을 이루고 있어 열원이 분산되지 않고 열 전달을 하는 반면에 불룩한 부분이나 오목한 부분에서 곡면으로 변하는 부분에서는 변형원이 발생하여 완전한 열 전달이 이루어 지지 않기 때문인 것으로 판단된다.

(3) AISI 1045의 경우 적정 예열온도의 레이저 출력이 90W 아래의 온도이며 Inconel718의 경우 150W 근처의 출력이라는 점을 확인 하였다.

(4) 레이저열원에 의한 예열효과를 가지기 어려운 형상에 대해서 턴밀과 다축 제어를 이용한 레이저 예열방법에 대해 제시하였다.

(5) 해석 결과와 실험 결과의 비교를 통해 오차율이 9 % 이하의 범위로 발생하는 것을 확인하였다.

본 연구는 곡면형상에서의 레이저보조가공을 위한 연구이며, 본 연구의 결과를 다양한 곡면형상의 레이저보조가공에 적용 할 수 있을 것이다.

후 기

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

REFERENCES

1. Jeon, Y. and Lee, C. M., "Current Research Trend on Laser Assisted Machining," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 2, pp. 311-317, 2012.
2. Research Report of the National Research Foundation of Korea, "A New Conceptual 3-Dimensional Laser Assisted Machining System," No. 2013035186, 2013.
3. Bermingham, M., Schaffarzyk, P., Palanisamy, S., and Dargusch, M., "Laser-Assisted Milling Strategies with Different Cutting Tool Paths," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 74, No. 9-12, pp. 1487-1494, 2014.
4. Oh, W. J., Kim, E. J., and Lee, C. M., "Study on Accuracy Evaluation of Laser Changer for a Laser-Assisted Machining System," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 32, No. 8, pp. 687-692, 2015.
5. Kang, D.-W. and Lee, C.-M., "A Study on Determining the Exponents for a Constitutive Equation in Laser Assisted Machining," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 14, No. 11, pp. 2051-2054, 2013.
6. Sim, M.-S. and Lee, C.-M., "A Study on the Laser Preheating Effect of Inconel 718 Specimen with Rotated Angle with Respect to 2-Axis," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 15, No. 1, pp. 189-192, 2014.
7. Woo, W. and Lee, C., "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.
8. Song, Y. U., Hur, J. Y., and Youn, S. K., "Study of the Shape Optimization in Spline FEM Considering both NURBS Control Point Positions and Weights as Design Variables," *Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers: A*, Vol. 38, No. 4, pp. 363-370, 2014.
9. Choi, B. K., Jeon, C. S., Yoo, W. S., Pyoun, Y. S., and Jeong, Y. C., "CAD/CAM System and CNC Machining," *SciTech Media*, pp. 213-216, 2001.
10. Oh, W. J. and Lee, C. M., "Laser Preheating Method for Three-Dimensional Laser Assisted Milling," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 32, No. 12, pp. 1031-1037, 2015.
11. Cha, N.-H., Woo, W.-S., and Lee, C.-M., "A Study on the Optimum Machining Conditions for Laser-Assisted Turn-Mill," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 16, No. 11, pp. 2327-2332, 2015.
12. Kim, J.-H., Choi, J.-Y., and Lee, C.-M., "A Study on the Effect of Laser Preheating on Laser Assisted Turn-Mill for Machining Square and Spline Members," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 15, No. 2, pp. 275-282, 2014.

13. 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.
14. Qiao, Z., Wang, T., Wang, Y., Hu, M., and Liu, Q., "Bézier Polygons for the Linearization of Dual Nurbs Curve in Five-Axis Sculptured Surface Machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 53, No. 1, pp. 107-117, 2012.