한국정밀공학회지 제 32 권 제 12 호 pp. 1031-1037
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 12, pp. 1031-1037
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2015.32.12.1031

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 XI

3 차원 레이저 보조 밀링을 위한 레이저 예열 방법에 관한 연구

Laser Preheating Method for Three-Dimensional Laser Assisted Milling

오원정 [1], 이춘만 [1,✉]
Won-Jung Oh[1] 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: 2015.10.14. / Revised: 2015.11.10. / Accepted: 2015.11.11.

Laser assisted machining (LAM) is an effective method with which to effectively process difficult-to-cut materials. Simple machining processes, such as turning and linear tool paths, have been studied by many researchers. But, there are few research efforts on LAM workpieces using three-dimensional shapes because of difficulties controlling the laser heat on workpieces with inclined angles or curved surfaces. Two methods for machining three-dimensional workpieces are proposed in this paper. The first is that the heat source shape and laser focal length are maintained using an index table. Second, a rotary type laser module is controlled using an algorithm to move the laser heat source in all directions. This algorithm was developed to control the rotary type laser module and the machine tool simultaneously. These methods are verified by a CATIA simulation.

KEYWORDS: Laser assisted milling (레이저 보조 밀링), Three-Dimensional machining (3 차원 가공), Laser focal length (레이저 초점거리), Laser heat source (레이저 열원)

기호설명

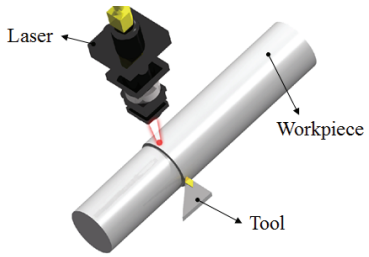
d = The distance between the tool and the laser heat source
θ = The angle of laser module
f = Feed rate
Δx = The difference of x-coordinate
Δy =The difference of y-coordinate

1. 서론

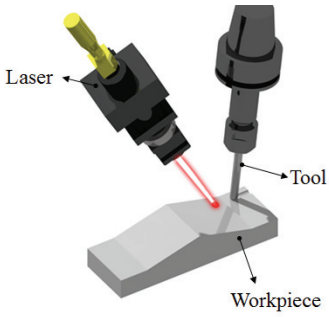
난삭재는 기계적 성질이 우수하여 자동차, 조선, 항공 · 우주 산업에 사용되는 빈도가 늘어나고 있다. 하지만, 소재가 가지는 물리적 · 화학적 성질 때문에 절삭성이 좋지 않아 가공 시 공구수명이 짧아지며, 가공비용이 증가하게 된다.[1] 또한 절삭칩의 처리와 가공 방법의 비효율성으로 인해 에너지 효율이 감소 되고 환경문제를 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Kim등[2]은 레이저 보조 가공, 플라즈마 보조 가공, MQL(극미량윤활)을 이용한 가공, 냉풍가공을 제시하였다.

Fig. 1은 레이저 보조 가공(Laser assisted machining)을 나타낸다. Fig. 1(a)는 레이저 보조 선삭, Fig. 1(b)

Copyright Ⓒ The Korean Society for Precision Engineering
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.



(a) Laser assisted turning



(b) Laser assisted milling

Fig. 1 Laser assisted machining

는 레이저 보조 밀링을 나타낸다. 레이저 보조 가공은 공구 앞에서 레이저 열원이 공작물을 예열하면서 가공하는 방법이다. 레이저 보조 가공을 통해 난삭재 가공 시 소재를 연화함으로써 절삭에너지를 감소시키며 가공성을 향상할 수 있다.[3,4]

레이저 보조 선삭은 독일의 DMG MORI[5]와 INDEX[6]가 상용화 하였고, 국내에서도 A사[7]가 개발한 바 있다.

레이저 보조 밀링의 경우는 Melkote,[8] Ding,[9] Bermingham,[10] Wiedenmann[11]과 Brecher[12]가 연구한 바 있다. 하지만, 대부분 평면가공이나 마이크로 엔드밀링(Micro end-milling) 분야에 한정적으로 연구되고 있다. 그러나 자동차, 조선, 항공 산업 등에 적용하기 위해서는 복잡한 형상의 3차원 가공에 대한 연구가 필요하다.

Kim등[13]은 Inconel 718의 레이저 예열 온도에 따른 절삭 깊이 선정과 절삭력 및 예열 온도 예측에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 Kim[14]과 Sim[15]은 3차원 가공을 위한 기초연구로써, 경사각을 가진 공작물에 대한 연구를 수행한 바 있다. Woo[16]와 Kim[17]은 실린더 형상과 구형 형상을 가진 공작물의 레이저 보조 밀링에 대한 연구를 수행하였다.

레이저 보조 밀링에서는 공구 경로 앞에서 선행하는 레이저 열원의 형상이 변하면 예열 효과가

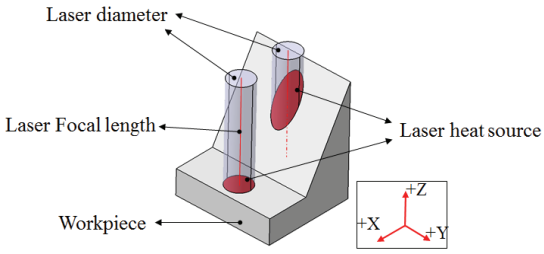


Fig. 2 Shape variation of heat source according to inclination angle of a workpiece

떨어진다. 따라서 복잡한 형상의 제품을 가공하기 위해 레이저 초점거리 및 열원의 형상이 일정하도록 제어하여 예열 효율을 높여야 한다. 또한 복잡한 형상의 3차원 제품을 가공하기 위해서는 레이저 열원의 위치가 공구 주변의 모든 위치로 이동 가능해야 하며, NC(Numerical control) 공작기계와 동시제어가 가능한 레이저 모듈 제어 시스템이 구축되어야 한다.

Kim등[18]은 회전 운동축 2개를 가지는 레이저 모듈 개발에 대한 연구를 수행하였고, Bermingham 등[8]은 선형 운동축 3개를 가지는 레이저 모듈에 대한 연구를 수행하였는데, 이 모듈들은 레이저 가열 영역이 좁아 복잡한 3차원 형상의 공작물에는 한계가 있다.

본 연구에서는 3차원 형상의 공작물의 레이저 보조 가공 시 인덱스 테이블의 회전(Tilting)을 이용한 레이저 초점거리 유지 방법을 제안하였다. 또한, 레이저 열원의 위치가 공구 주변의 모든 위치로 이동 가능한 회전식 레이저 모듈을 이용한 레이저 예열 방법을 제안하였다.

2. 예열 방법

2.1 인덱스 테이블 회전(Tilting)에 의한 레이저 초점거리 및 열원형상 유지 방법

Fig. 2는 공작물의 경사각도에 따른 초점거리와 열원형상의 변화를 나타내고 있다. 레이저 초점거리와 열원형상이 일정하지 않으면 레이저 예열 효율이 감소한다. 이는 절삭력의 증가로 이어지게 되며, 가공 표면이 거칠어지는 원인이 된다. 이를 방지하기 위해서는 레이저 모듈에 대한 이송축을 추가하거나 레이저의 초점거리가 일정하도록 가공 경로를 수정하는 방법이 있다. 레이저 모듈에 대한 이송축을 추가할 경우 레이저 초점은 유지할

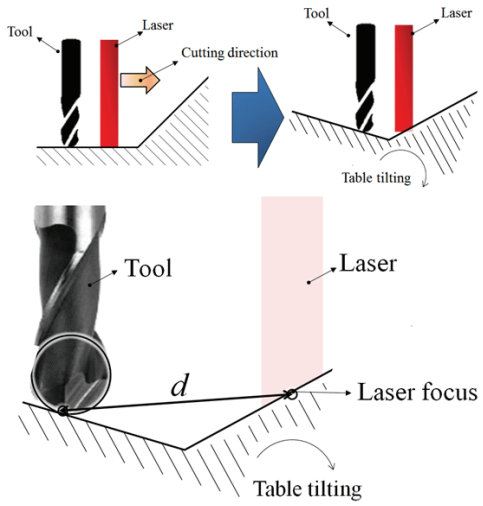


Fig. 3 The method for keeping the laser focal length and heat source shape

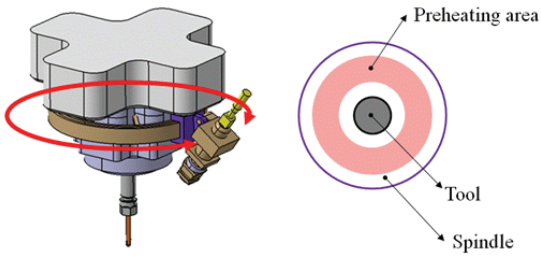
수 있지만 경사면이 클수록 열원형상의 변화가 커지게 된다.

반면, 테이블 회전 즉, A축의 틸팅(Tilting)을 통해 레이저 초점거리를 제어할 경우 부가적인 장치가 필요하지 않아 용이하게 열원형상을 일정하게 유지할 수 있다. 또한 레이저의 출력에너지는 적게 소모되며 일정한 열 에너지를 원하는 면적에 공급할 수 있다.

테이블 틸팅을 통한 레이저 초점거리 및 열원형상을 유지하는 방법을 Fig. 3에 나타내었다. 선행하는 레이저 열원이 경사진 부위에 도달하면, 테이블을 틸팅시켜 레이저의 초점거리와 열원형상을 가능하면 일정하게 유지하는 방법이다. 레이저 초점(Laser focus)과 공구접촉점(Cutter contact point)의 거리 d를 일정하게 유지시키는 인덱스 테이블의 틸팅 각도를 이용하면 공구접촉점의 NC 코드를 계산할 수 있다. 이 NC 코드를 사용하면 경사각 변화에 따른 레이저 초점거리 변화 및 레이저 열원형상 변화를 최소화 할 수 있다.

2.2 회전식 레이저 모듈

기존 레이저 보조 밀링은 스핀들에 레이저 모듈이 고정되어 있어 다양한 경로를 가공하기가 용이하지 않다. 3차원 형상의 레이저 예열을 위해서 레이저 모듈의 선형 운동 및 회전 운동을 위한 축을 추가하는 방법이 연구 되고 있다. 하지만, 자유도(DOF: degree of freedom)가 늘어나면 제어는 어려



(a) Isometric view (b) Bottom view

Fig. 4 The rotary type laser module and preheating area

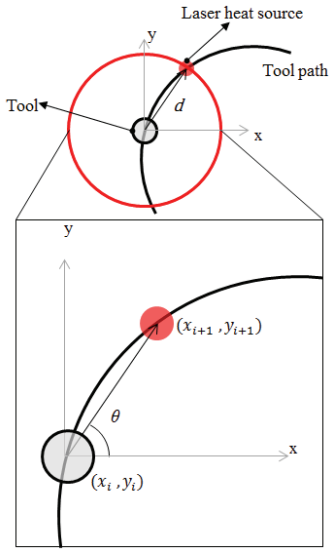


Fig. 5 Moving method of the rotary type laser module

워진다. 그러므로 NC 코드에 레이저 모듈의 제어를 접목시키기 위해서 레이저 모듈의 자유도는 최대한 적게 하는 것이 좋다. 그러므로 본 연구에서는 회전축 1개를 가지는 레이저 모듈의 제어와 예열 경로를 제안하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 제안한 회전식 레이저 모듈이다. 이 모듈은 기존의 레이저 모듈에 비해 자유도가 적어 제어가 쉬우며 레이저 예열 가능 방향은 360°로 3차원 가공에 적합하다. 제안한 회전식 레이저 모듈의 제어 방법은 NC 코드에서 좌표 데이터를 추출하여 레이저 모듈의 회전각 θ 를 구하는 방법이다. NC 코드에는 가공경로에 대한 정보가 있다. 이 정보를 사용하여, 공구 중심을 원점으로 하고 반지름을 공구중심과 레이저 열원 중심의 거리로 하는 원과 가공경로의 교점이 레이저 열원 좌표이다.

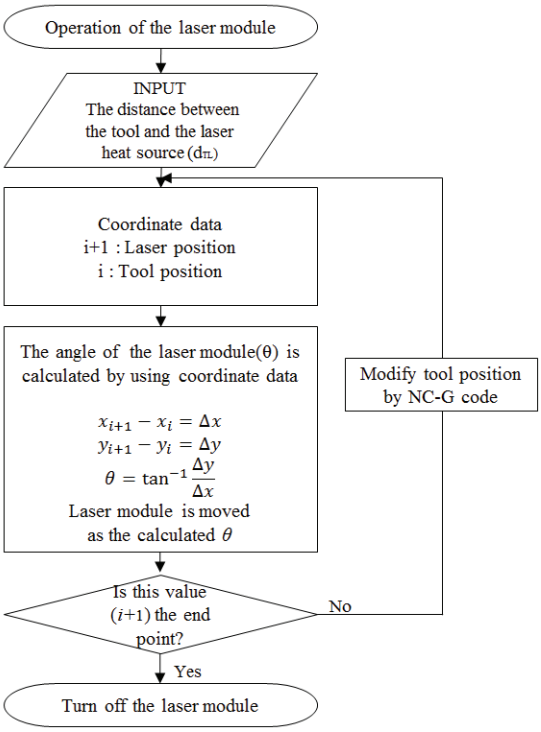


Fig. 6 Moving algorithm of the rotary type laser module

Fig. 5는 회전식 레이저 모듈의 이송방법을 보여주는데, 좌표값에 의해 회전식 레이저 모듈의 각도 θ 는 다음 식(1) 과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}\frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{1}$$

구해진 θ 만큼 회전식 레이저 모듈이 회전하며 레이저 열원은 예열 경로를 따라 이동하게 된다. 이러한 회전식 레이저 모듈의 작동 알고리즘은 Fig. 6에 나타내었다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 모델 및 조건

Fig. 7은 제안된 2가지 방법에 의해 예열 시뮬레이션을 하기 위한 시편을 나타내었다. 인덱스 테이블을 이용한 초점거리 유지방법을 확인하기 위해 15° 경사면을 가지는 형상을 선정하였고, 회전식 레이저 모듈을 이용한 열원 이동의 확인을 위해서 90°의 꺾인 경로를 가지는 예열 경로를 선정하였다.

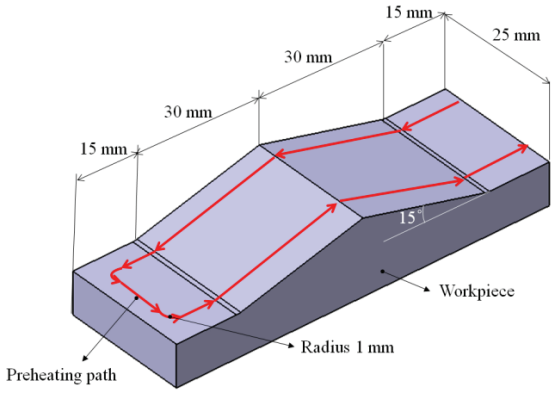


Fig. 7 The workpiece for preheating simulation by the tilting and the rotary type laser module

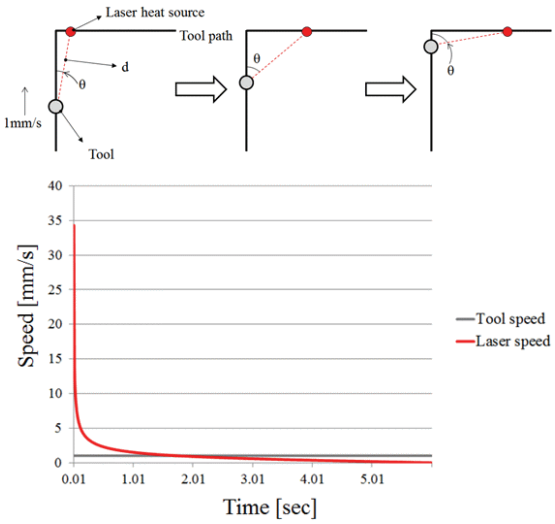


Fig. 8 Tool and laser heat source speed at a corner

Fig. 8은 공구와 레이저 모듈의 이송속도를 시뮬레이션 한 결과이다. 이 경우 예열 경로가 직각으로 꺾이게 되어 레이저 열원이 공구의 속도보다 매우 빠른 속도로 움직이게 된다. 레이저 열원의 속도를 줄여주기 위해 예열 경로 모서리를 반지름 1 mm의 원으로 곡면처리 하였다.

레이저 보조밀링의 시뮬레이션은 카티아(CATIA)의 Digital mockup(DMU)의 Kinematics를 사용하였다.

Fig. 9는 레이저 보조밀링을 구현하기 위한 NC 공작기계와 회전식 레이저 모듈을 나타낸다. 인덱스 테이블을 이용한 초점거리 유지 방법을 구현하기 위해서 인덱스 테이블(A축)이 틸팅된다.

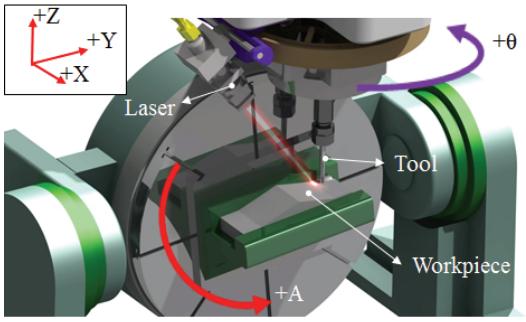


Fig. 9 Simulation model for laser-assisted milling

Table 1 Simulation conditions

Distance between tool and laser (d)	5 mm
Feed rate (f)	100 mm/min
Laser module turning circle radius	67.5 mm
Tool path fillet radius	1 mm
Laser heat source diameter	3 mm
Ball-End-Mill diameter	4 mm

Table 1은 해석 조건을 나타낸다. 공구와 레이저 열원 사이의 거리는 5 mm, 이송속도는 100 mm/min, 레이저 모듈의 회전 반지름은 67.5 mm, 레이저 열원 지름은 3 mm, 공구 지름은 4 mm로 선정하였다.[19]

3.2 시뮬레이션 결과

Fig. 10에 각 시간에 따른 시뮬레이션 결과를 보여주며, Fig. 11에는 CNC 공작기계의 좌표값과 회전식 레이저 모듈의 각도를 나타내었다. 예열 경로 이동 시간은 총 122초가 소요되었으며, 회전식 레이저 모듈이 90° 회전하는 시간은 6.6초가 소요되었다. 회전식 레이저 모듈의 평균 속도는 15.86 mm/s 이며 최고 속도는 22.1 mm/s 로 나타났다.

Fig. 12는 레이저 열원이 15° 경사면에 진입할 때의 열원형상 변화를 나타낸다. 레이저 열원이 경 사면에 진입하는 순간 열원의 형태가 변형되지만 곡면처리 된 구역을 벗어나면 A구역(평면)과 B구역(15° 경사면)의 열원형상은 동일하였다.

Fig. 13에는 경사진 시편에서 레이저 열원 이동 시 레이저 초점거리 및 공구와 레이저간의 거리가 유지됨을 나타내었다. 레이저 초점거리는 경사면에 상관없이 일정하게 유지되었다.

Fig. 14에 90°꺾인 예열 경로의 예열 거리를 나타내었다. 예열 경로가 변경될 경우 레이저 열원과 공구 중심 사이의 거리는 5 mm로 일정하게 유

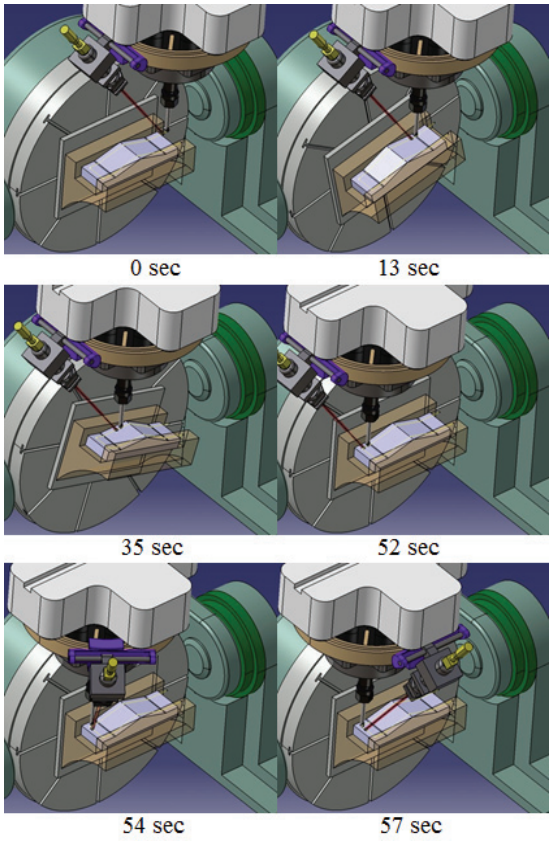


Fig. 10 Result of the simulation

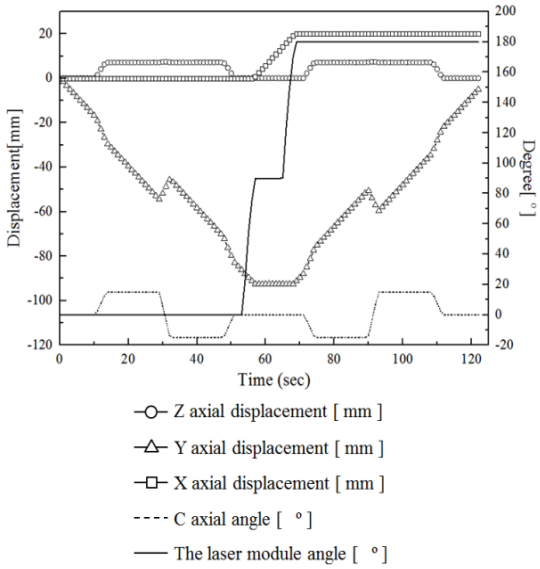


Fig. 11 Displacements and angles of the rotary type laser module and the machine tool

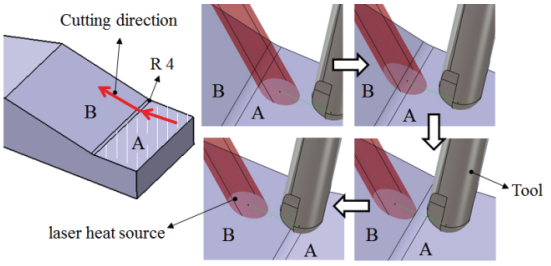


Fig. 12 Shape change of the laser heat source according to inclination angle

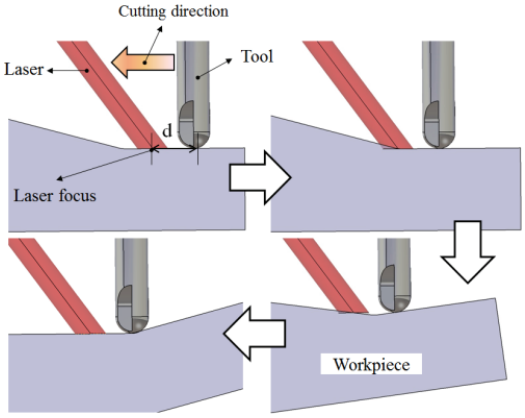


Fig. 13 Focal length according to inclination angle

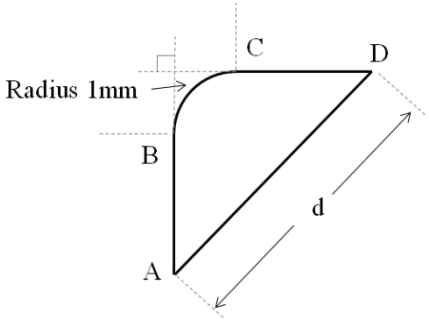


Fig. 14 Preheating distance at the corner

지되는 반면, 예열 경로의 예열 거리는 직선 AB, 호 BC, 직선 CD을 합한 값인 6.64 mm가 된다. 예열 경로의 예열 거리가 길어지면 공구가 절삭하는 부위의 소재의 온도가 상대적으로 낮을 것이라고 예측 할 수 있다. 그러므로 예열 경로가 꺾이는 부분에서 적정 예열온도를 유지시키기 위해서 레이저 출력제어가 필요하며, 레이저 출력 에너지에 대한 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 레이저 보조 밀링에서는 가공이 불가능했던 3차원 형상의 가공을 위한 레이저 보조 밀링용 모듈과 예열 방법에 대해서 연구하였다. 인덱스 테이블 틸팅을 통해 레이저 초점거리를 유지하여 일정한 예열 효과를 얻는 방법과 회전식 레이저 모듈을 통해 모든 방향으로 레이저 열원을 이동시키는 방법을 제시하였다. 회전식 레이저 모듈의 속도, 레이저 열원과 공구 중심 사이의 거리를 고려하여 실제 가공에 적용할 수 있도록 구상하였다. 카티아를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 테이블 회전 즉, A축의 틸팅을 통해 레이저 초점거리를 제어할 경우 부가적인 장치가 필요하지 않아 용이하게 열원형상을 일정하게 유지할 수 있다. 또한 레이저의 출력에너지는 적게 소모되며 일정한 열 에너지를 원하는 면적에 공급할 수 있다.

(2) 회전식 레이저 모듈을 사용할 경우 레이저 열원이 공구 주변의 모든 위치로 이동이 가능하다. 단, 예열 경로의 변경 각도가 90°일 경우 회전식 레이저 모듈의 속도가 공구 이송속도에 비해 매우 빠르기 때문에 사용이 제한될 수 있다. 그러므로 경계지점에서의 절삭이동속도를 작게 설정하거나 공구경로 모서리부분에 경사지게 처리하거나 또는 곡면 처리를 제안한다.

(3) 예열 경로의 각도변경이 발생한 경우 예열 경로의 예열 거리가 레이저 열원 중심과 공구접촉점의 거리보다 커지게 되어 적정 예열이 이루어 지지 못할 가능성이 있다. 그러므로 예열 경로 변경 각도에 따른 레이저 출력에 대한 연구가 필요하다.

후 기

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

REFERENCES

1. Park, M. H., “Ultrasonic Vibration Machining of Inconel,” Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers: A, Vol. 27, No. 3, pp. 357-362, 2003.

2. Kim, D. H., Kim, K. S., and Lee, C. M., "Environment-Friendly Cutting Technology of Difficult-to-Cut Material," Journal of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 52, No. 2, pp. 43-47, 2012.
3. Sun, S., Brandt, M., and Dargusch, M. S., "Thermally Enhanced Machining of Hard-to-Machine Materials: A Review," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 50, No. 8, pp. 663-680, 2010.
4. Kang, D. W. and Lee, C. M., "A Study on the Development of the Laser-Assisted Milling Process and a Related Constitutive Equation for Silicon Nitride," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 63, No. 1, pp. 109-112, 2014.
5. DMG MORI, "Product," http://en.dmgmori.com/products (Accessed 26 November 2015)
6. INDEX, "Production Turning Machines," http://www.index-traub.com/en/index/production-turning-machines (Accessed 26 November 2015)
7. AMECO, "Research and development," http://www.ameco.co.kr/estimate/estimate1.php (Accessed 26 November 2015)
8. Melkote, S., Kumar, M., Hashimoto, F., and Lahoti, G., "Laser Assisted Micro-Milling of Hard-to-Machine Materials," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 58, No.1, pp. 45-48, 2009.
9. Ding, H., Shen, N., and Shin, Y. C., "Thermal and Mechanical Modeling Analysis of Laser-Assisted Micro-Milling of Difficult-to-Machine Alloys," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, No. 3, pp. 601-613, 2012.
10. Bermingham, M. J., Schaffarzyk, P., Palanisamy, S., and Dargusch, M. S., "Laser-Assisted Milling Strategies with Different Cutting Tool Paths," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 74, No. 9-12, pp. 1487-1494, 2014.
11. Wiedenmann, R. and Zaeh, M. F., "Laser-Assisted Milling-Process Modeling and Experimental Validation," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 8, pp. 70-77. 2015.
12. Brecher, C., Rosen, C. J., and Emonts, M., "Laser-Assisted Milling of Advanced Materials," Physics Procedia, Vol. 5, No. A-B, pp. 259-272, 2010.
13. 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.
14. Kim, K. S., Kim, T. W., and Lee, C. M., "Analysis of a Laser Assisted Milling Process with Inclination Angles," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 14, No. 8, pp. 1495-1499, 2013.
15. 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.
16. 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.
17. Kim, I. W. and Lee, C. M., "A Study on the Thermal Analysis of Laser-Assisted Machining for Inconel 718 Specimens with Spherical Shape," Proc. of KSPE Spring Conference, Vol. 5, p. 143, 2015.
18. Kim, D. H., Jung, D.W., and Lee, C. M., "Study on Angle Calculation of Two-Axis Manipulator for Laser Assisted Machining," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 2, pp. 113-117, 2014.
19. Baek, J. T. and Lee, C. M., "Analytical Study of the Determination of Distance between the Laser Heat Source and Tool for Laser-Assisted Machining," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 8, pp. 699-704, 2015.