

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 IX

3 차원 레이저 보조 밀링을 위한 실린더형 시편의 예열효과에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on the Preheating Effect of Workpiece with Cylindrical Shape for 3-Dimensional Laser-Assisted Milling

우완식^{1,✉}, 이춘만^{1,✉}
Wan-Sick Woo¹ 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: 2014.12.1 / Accepted: 2014.12.6

Laser-assisted machining (LAM) is an effective machining method for processing difficult-to-cut materials. Prediction and estimation of preheating effect of the LAM is difficult because of moving heat source. So it is necessary to study the preheating effect of the laser heat source irradiated on the curved surfaces of workpieces of various shape. In this paper, thermal analysis of the LAM for 3-dimensional workpiece with cylindrical shape was performed. The results of this analysis can be applied to obtain the optimal preheating method and path for LAM of 3-dimensional workpiece.

Key Words: Laser assisted milling (레이저 보조 밀링), Cylindrical shape (실린더 형상), Laser preheating (레이저 예열), Distorted circle (변형원)

1. 서론

레이저 보조 가공은(Laser assisted machining, LAM) 가공이 어려운 소재를 레이저로 예열하여 연화시킨 후 절삭하는 방법이다. 최근 다양한 산업분야에서 난삭재를 이용한 제품의 수요가 증가함에 따라 레이저 보조가공에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 미국, 독일 및 한국에서 레이저 보조 선삭(Laser assisted turning)에 대한 연구가 진행 중에 있으며 상용화된 장비가 개발된 상태이다. 그러나 레이저 보조 밀링(Laser assisted milling)에

대한 연구는 미미한 실정이다. 레이저 보조 밀링은 소재의 형상 및 가공경로에 따라 이동하는 레이저 열원의 변화를 예측하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 소재의 형상 및 이동하는 열원에 대한 해석을 통해 적절한 예열조건을 선정하기 위한 연구가 수행되고 있다.¹⁻⁴

Ahn⁵은 레이저 보조 가공에서 레이저 열원을 해석하기 위해 새로운 대면적 해석기법을 적용하였다. Kim⁶은 레이저 보조 선삭에서 유한요소해석과 수치적 계산 방법을 비교하였다. Kim 등⁴은 레이저 보조 밀링에서 열원의 이송속도에 따른 평

판 소재의 표면온도를 유한요소해석을 통해 분석하였다. Sim등⁷은 레이저 보조 밀링에서 경사진 평판 소재에 대한 레이저 열원을 분석하고 유한요소 해석을 하였다.

레이저 보조 밀링에서 평판 소재에 대한 레이저 열원의 해석은 최근 국내외에서 연구가 진행되고 있다. 그러나 레이저 보조 밀링을 상용화하기 위해서는 3차원 형상에 적용할 수 있도록 곡면을 가지는 소재에 대한 레이저 예열방법 및 조건을 선정해야 한다.

본 연구에서는 3차원 형상에 레이저 보조 밀링을 적용하기 위해 실린더 형상을 가지는 소재에 대한 레이저 열원 해석을 수행하였다.

2. 예열방법

실린더 형상을 가지는 소재에 대한 적절한 예열 방법을 선정하기 위하여 4가지 방법을 고안하였다.⁸

Fig. 1은 레이저와 지면이 90°를 이루면서 x축 방향으로 레이저가 움직이며 예열하는 방법이다. 레이저 열원이 실린더 형상의 최상단 중앙에 위치하며 레이저와 90°를 이루므로 곡면에서 가질 수 있는 최소 변형원(Distorted circle)에 대한 예열 효과를 확인할 수 있다.

Fig. 2는 레이저와 지면이 이루는 각도에 따른 레이저 예열효과를 확인하기 위한 방법이다. 레이저의 각도에 따라 발생하는 변형원에 의한 열 손실을 해석을 통해 예측하여 적절한 예열방법을 선정한다. 레이저 각도가 90°로 예열하는 경우는 소재의 끝 단에서 변형원이 아주 크게 발생하여 예열효과가 상대적으로 낮을 것이라고 예측할 수 있다.

Fig. 3은 Table tilting 방법으로 레이저는 실린더면에 접하는 위치에 수직으로 일정하게 고정되고 테이블이 틸팅하면서 예열한다.

3. 유한요소해석

3.1 해석 모델

곡면을 가지는 3차원 형상인 실린더 형상과 구면 형상을 해석 모델로 선정하였다.

Fig. 4는 해석 모델 및 메쉬(Mesh)를 나타낸다. 육면체 메쉬(Hex dominant mesh)를 적용하였으며, 전체 메쉬 및 각 표면마다 메쉬 사이즈를 다르게 지정하였다. 열원이 지나가는 부분(Laser spot zone)은 직접적으로 레이저가 조사되는 부분이기 때문

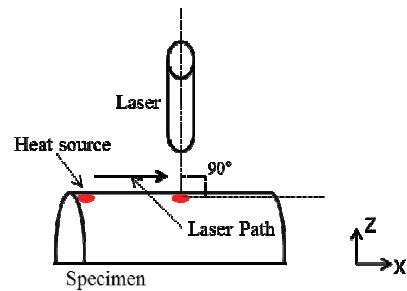


Fig. 1 Preheating method (Type 1)

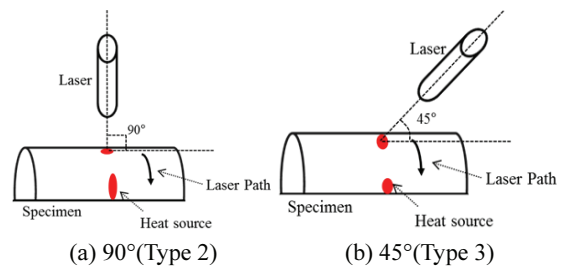


Fig. 2 Preheating methods according to laser angle (Type 2 and 3)

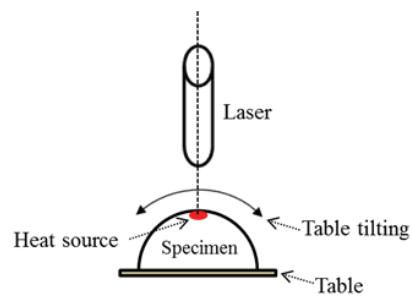


Fig. 3 Preheating method of table tilting (Type 4)

Table 1 The size and mesh condition of the cylindrically shaped model

Model size		Ø33×40mm
Mesh	Total	5mm
	Cylindrical surface	1mm
	Laser spot zone	0.25mm
Nodes		120260

에 메쉬의 크기를 가장 작게 하였다. 인접한 곡면 역시 온도분포 및 결과에 중요한 영향을 미치므로 상대적으로 작게 생성하였다.

Table 1은 해석에 사용된 모델의 사이즈 및 메쉬 조건을 나타낸다.

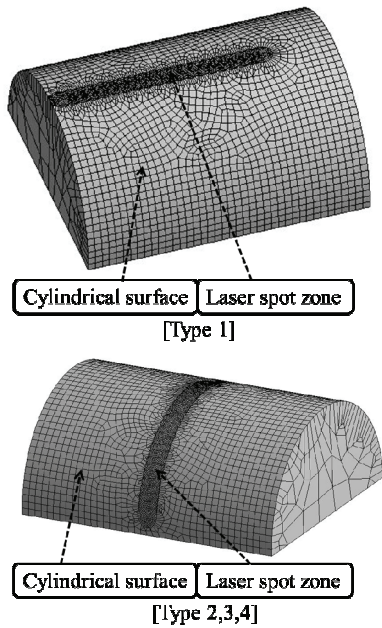


Fig. 4 The analysis models

3.2 해석 조건

Table 2는 해석 조건을 나타낸다. ANSYS Workbench를 사용하였고, 소재는 SM45C를 적용하였다.

열해석 시 중요한 물성은 소재의 열전도도 (Thermal conductivity)와 비열(Specific heat)이다. 따라서 온도에 따른 소재의 열전도도 및 비열을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었으며, 밀도는 7850 kg/m³으로 온도의 따른 변화 없이 일정하게 유지하였다.²

레이저 예열 방법에 따른 레이저 예열 효과를 확인하기 위하여 적정예열온도를 선정하였으며, Table 2에 명시된 적정 예열 온도는 소재의 어닐링 (Annealing)온도와 변태점 사이의 온도로 선정하였다. SM45C의 어닐링 온도는 550℃이며, 변태점은 726℃이다.

SM45C의 레이저 흡수율은 향후 실험에서 사용할 고출력다이오드레이저(HPDL)의 특성을 고려하여 0.31로 적용하였다.^{10,11}

3.3 해석 결과

각 예열 방법에 따른 변형원의 형태를 Fig. 7에 나타내었다. Type 1인 경우와 Table tilting 방법(Type 4)은 최소 변형원을 가지며 크기가 같다. Fig. 8은 Type 1에 대한 해석결과를 나타내었으며, 최소 변

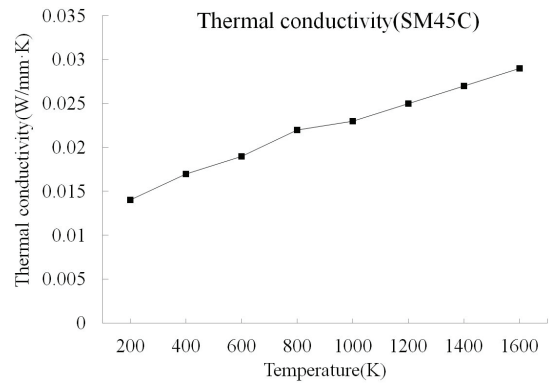


Fig. 5 Thermal conductivity of SM45C according to the temperature

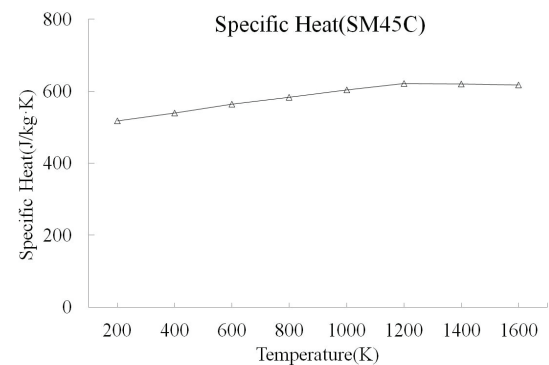


Fig. 6 Specific heat of SM45C according to the temperature

Table 2 Analysis condition

Material	SM45C
Laser feed rate	1.67mm/s
Heat source diameter	3mm
Proper preheating temperature	650°C
Convection	8W/m ² °C
Thermal load type	Heat flow

형원에 대한 일정한 예열 효과를 확인하였다. Fig. 9와 Fig. 10의 해석결과는 Type 1과는 다른 경로이며, 레이저 조사 각도에 따른 해석 결과이다. 레이저 조사각도가 90° (Type 2)인 경우에는 변형원의 크기가 가장 크게 발생하여 열원이 집중되지 못하여 퍼지는 현상을 볼 수 있으며 소재 끝 단에서의 예열 온도도 가장 낮았다.

반면, Fig. 11에 나타낸 Table tilting예열 방법은 Type 1과 마찬가지로 변형원의 크기가 가장 작고

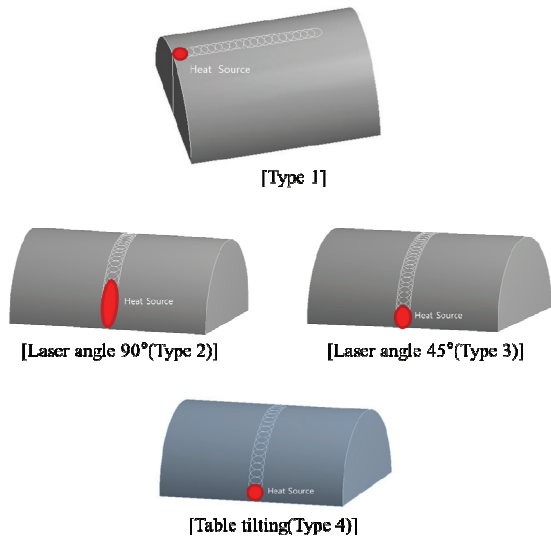


Fig. 7 Distorted circle according to preheating methods

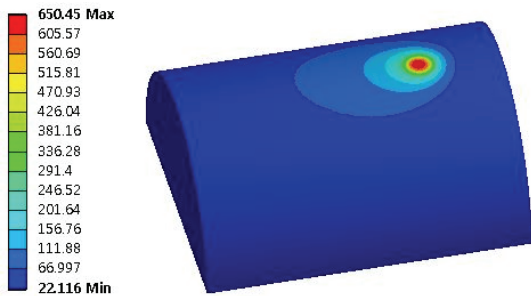


Fig. 8 The result of analysis (Type 1)

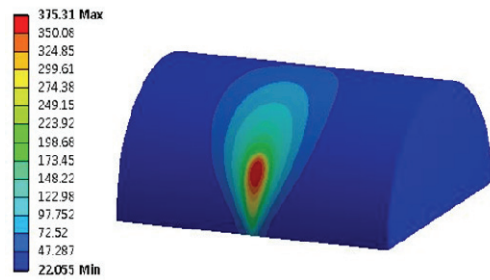
일정하여 높은 예열 효과를 나타낸다.

Table 3은 각 예열 방법에 따른 열원이 지나가는 부분에 최대 온도 및 최소 온도를 나타내었다.

레이저 각도가 90°인 경우(Type 2)는 소재의 끝단에서 열원의 최저온도가 SM45C의 어닐링 온도에 미치지 못하므로 레이저의 이송속도(Feed) 및 출력을 조절해서 예열 효과를 증가시켜야 할 것이다.

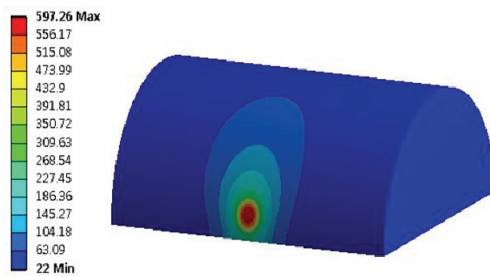
레이저 각도가 45°인 경우(Type 3)는 어닐링 온도와 선정된 적정예열온도 범위에 포함되지만 Table tilting 예열 방법(Type 4) 및 Type 1에 비해 변형원에 의한 열 손실이 있기 때문에 상대적으로 예열효과가 낮은 것으로 나타났다.

적정 예열 온도로 예열 하기 위한 레이저 출력은 각각 Type 1인 경우는 62W, Type 2인 경우는 66W, Type 3인 경우는 63W, Type 4인 경우는 61W였다.



[Laser angle 90°]

Fig. 9 The result of analysis (Type 2)



[Laser angle 45°]

Fig. 10 The result of analysis (Type 3)

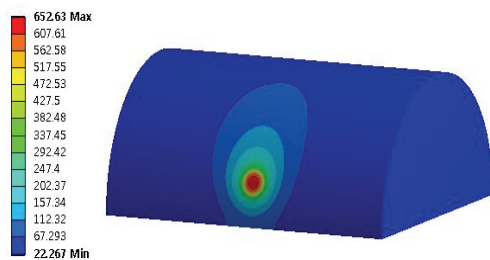


Fig. 11 The result of analysis (Type 4)

Table 3 Maximum and minimum temperature according to preheating methods

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Max. Temp. (°C)	650.45	654.02	656.62	652.63
Min. Temp. (°C)	650.45	375.31	597.26	652.63

레이저 출력의 에너지 효율성은 변형원에 따른 열 손실이 가장 적은 Type 4의 방법이 가장 우수하였다. Type 1과 Type 4가 같은 변형원임에도 불구하고 레이저 출력의 차이를 보이는 것은 레이저의 진행방향에 따른 예열 길이가 다르므로 축적된 온도차이 때문이다. 그러므로 예열 길이가 같다면 똑같은 예열 효과를 얻을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 레이저 보조 밀링 가공을 3차원 형상에 적용하기 위하여 실린더 형상을 가진 소재에 대한 레이저 예열 효과를 유한요소해석을 통해 분석하였다. 레이저 조사 각도 및 적정 예열온도를 고려하여 실제 가공에 적용할 수 있도록 구상하였다. 본 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존 평판에 관한 연구에서 나아가 실린더 형상을 가진 곡면에 조사된 레이저 열원에 대한 유한요소해석을 수행하였다.
- 2) 레이저 조사 각도 및 다양한 변형원에 따른 예열 효과를 예측하기 위해 4가지 예열 방법을 선정하였고, Type 1 및 Type 4와 같이 곡면에 조사된 최소 변형원에 대한 최대 예열 효과를 확인하였다.
- 3) 레이저 조사 각도가 90° (Type 2)일 때, 시편의 끝 단에서 변형원이 매우 크게 생성되었다. 온도는 시편 전체로 고루 퍼지는 듯 하였으나, 실제 가공 부인 레이저 열원이 지나가는 부분의 최저 온도가 소재의 어닐링 온도에 미치지 못한다. 그러므로 레이저 이송속도(Feed)를 줄이거나 출력을 증가시켜 예열 효과를 증가시키는 방법을 택해야 한다.
- 4) 레이저 조사 각도가 45° (Type 3)일 때, 소재의 양 끝 단에서 약간의 변형원이 발생하여 다소 열손실이 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 레이저 조사 각도가 90°일 때와 달리 레이저 열원이 지나가는 부분의 최고 온도 및 최소 온도가 어닐링 온도와 변태점 사이로 유지되어 적절한 예열 효과를 볼 수 있으리라 판단된다.
- 5) Table tilting 방법(Type 4) 및 Type 1은 선정한 예열 방법 중 변형원의 크기가 가장 작고 일정하게 유지되는 방법으로써 가장 낮은 레이저 출력으로 가장 높은 예열 효과를 얻었다.
- 6) 레이저 보조 가공 시 가공 경로 선정 및 예열 방법을 선정함에 따라 예열 효과가 다르며, 이는 가공 가능성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 장치의 특성에 맞게 변형원의 크기를 최소화할 수 있는 방법으로 가공하는 것이 효율적이다.

본 연구의 결과는 레이저 보조 밀링 가공 시 다양한 형상에 적용될 수 있도록 활용할 예정이다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(No. 2014022060).

REFERENCES

1. Kim, D. H. and Lee, C. M., "A Fundamental Study on the Evaluation of Machining Characteristics in Laser-assisted Milling of Titanium alloys," Proc. of KSPE Spring Conference, p.136, 2014.
2. 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.
3. Rozzi, J. C., Pfefferkorn, F. E., and Shin, Y. C., "Experimental Evaluation of the Laser Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 122, No. 4, pp. 666-670, 2000.
4. Kim, K. 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.
5. Ahn, S. H. and Lee, C. M., "A Study on Large-area Laser Processing Analysis in Consideration of the Moving Heat Source," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 12, No. 2, pp. 285-292, 2011.
6. Kim, J. H., Choi, J. Y., and Lee, C. M., "Thermal Analysis for Laser Assisted Turning of Square Bar using Laser Heat Source Projection Method," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 12, pp. 1353-1358, 2011.
7. Sim, M. S. and Lee, C. M., "A Study on the Laser Preheating Effect of Inconel718 Specimen with Rotated Angle with Respect to 2-axis," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 15, No. 1, pp. 189-192, 2014.
8. Woo, W. S. and Lee, C. M., "A Basic Study on Laser Preheating Effect for Cylindrical SM45C Specimens," Proc. of KSPE Spring Conference, p. 610, 2014.
9. Kim, I. W. and Lee, C. M., "A Basic Study on Laser Preheating Effect of SM45C Specimens with

- Spherical Surface,” Proc. of KSPE Spring Conference, p. 609, 2014.
10. Lusquinis, F., Conde, J. C., Bonss, S., Riveiro, A., Quintero, F., et al., “Theoretical and Experimental Analysis of High Power Diode Laser (HPDL) Hardening of AISI 1045 Steel,” Applied Surface Science, Vol. 254, pp. 948-954, 2007.
 11. Park, T. W., Cho, J. H., and Na, S. J., “A Study on Laser Joining Low Carbon Steel and Aluminum Alloy - Part 2 : Process Analysis,” Journal of KWS, Vol. 23, No. 5, pp. 31-37, 2005.