

◆ 특집 ◆ 최신 레이저 가공 및 해석 기술

사각형재의 레이저 예열 선삭에서 레이저 열원 투영법을 이용한 열해석

Thermal Analysis for Laser Assisted Turning of Square Bar using Laser Heat Source Projection Method

김재현¹, 최준영¹, 이춘만^{1,✉}
Jae-Hyun Kim¹, Jun-Young Choi¹ and Choon-Man Lee^{1,✉}

¹ 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering, Changwon National Univ.)
✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Manuscript received: 2011.10.12 / Accepted: 2011.10.25

LAT(Laser Assisted Turning) is a method that applies a machining process after softening a workpiece in which a preheating process is locally applied to its machining section using laser heat source. LAT shows several advantages, such as high productivity, reduction of manufacturing cost, high quality. Analysis of temperature distribution after preheating for LAT is very difficult due to its very small heat input area and large energy and its movement. Also, the LAT for a square bar is more difficult because the shape of a laser heat source can be changed according to the rotation of the workpiece. In this study, thermal analysis for LAT of square bar was performed using laser heat source projection method. And, the analysis results were compared with the results of the prior study of numerical calculation method. It is thus shown that the proposed method is efficient for the thermal analysis of a shaped bar.

Key Words: Laser assisted Turning (레이저 예열 선삭), Laser Heat Source (레이저 열원), Projection Method (투영법)

1. 서론

레이저 예열 선삭(Laser Assisted Turning; LAT)은 레이저 예열을 이용하여 재료의 가공부위를 국부적으로 가열함으로써 재료를 연화시키고, 취성 파괴를 억제하여 소성변형에 의해서 칩을 형성시키는 절삭 가공법이다.¹⁻³ 이러한 레이저 예열 선삭은 기계적 성질이 뛰어난 니켈, 세라믹 등과 같은 취성재료에 대한 가공이 가능해진다.^{4,5} 레이저 예열 선삭을 세라믹 가공에 적용하면 기존 방식보다 10 배 이상의 가공시간 단축이 가능하며 생산성 향상, 제조단가 절감, 경량화 실현, 친환경성 및 효율성

을 동시에 충족시킬 수 있을 것으로 기대된다.⁶⁻⁹

그러나 레이저 직접 가공에 관한 비교적 많은 연구나 실험이 진행되고 있는 반면 LAT 에 관한 연구는 미미한 편이며^{10,11} 장비 구축에 있어 많은 투자비용을 필요로 한다. 또한 재료의 성질에 따라서 레이저의 흡수율이 변화하며, 레이저의 출력에 따라 온도의 변화도 급격하게 일어난다.¹²

그리고 LAT 는 레이저 열원에 의한 재료의 예열과 동시에 공구에 의한 절삭 공정이 이루어지게 되기 때문에, 레이저 열원에 의해 재료와 공구에 직접적으로 열영향을 미치게 되며, 절삭력과 절삭열의 변화를 가져오게 되며¹³ 국부를 큰 에너지

밀도로 순간 가열하기 때문에 가열부는 조사가 끝난 다음 급랭되는 자가 쿨링(Self quenching)으로 진행된다.¹⁴ 따라서 이러한 변화를 예측하기 위한 연구나 해석은 LAT 에 있어 필수적이라고 할 수 있다.

Fig. 1 은 일반적인 원형재의 레이저 예열 선삭 공정의 개념도를 보여준다.

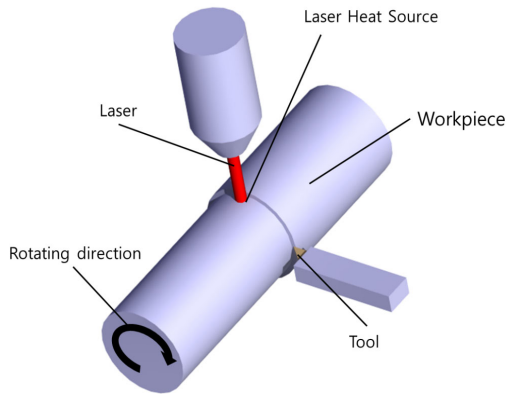


Fig. 1 Laser Assisted Turning

레이저 예열 선삭에서는 공구와 레이저 열원은 일정 이상의 각도 차이를 두고 위치하며, 절삭 지점이 레이저에 의해서 예열이 되면 소재의 회전에 의해서 곧 바로 공구에 의한 절삭 공정이 일어난다.¹⁵ 이는 시편이 계속적으로 회전하는 동시에 가공이 시작되는 지점을 가열하여 일정온도 이상 도달시켜야 안정적인 절삭공정이 수행되는 것이다. 하지만 사각 형태의 경우 회전하는 동안 소재와 레이저 조사부와의 거리는 달라지고 레이저와 접촉하는 소재의 면적도 계속적으로 변화하게 된다. 그러므로 이러한 레이저 열원 형상의 변화를 고려하는 해석 방법이 필요하다.

현재까지 선삭 공정의 열원 해석 연구는 소재 회전에 따른 레이저 열원의 변형 형상을 각도마다 계산하여 열원의 모양을 예측하고 해석 소프트웨어에 입력하는 수치적 계산 방법을 이용하였다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 레이저 열원 투영법을 제안하고, 사각형재의 온도분포를 예측하고자 한다. 또한, 기존의 수치적 계산 방법의 연구와 비교 분석하여 그 타당성을 검토 하였다. 예측된 온도 분포를 실제 가공에 적용함으로써 레이저 예열에 의한 소재의 용융을 방지하는 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 유한요소모델

2.1 레이저 예열 선삭의 해석 조건

수치적 계산 방법과 비교하기 위해 Fig. 2 와 같이 동일한 형태의 사각형재의 소재를 선정하였다.

소재의 재질은 기계구조용으로 널리 사용되고 있는 SM45C 로 자세한 해석 조건은 Table 1 에 나타내었다.

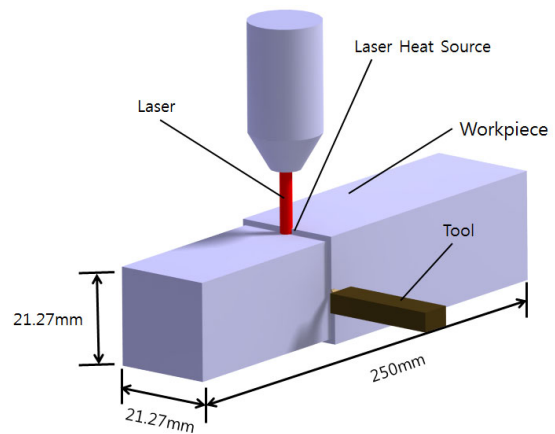


Fig. 2 LAT for the square bar used in this study

Table 1 Conditions of the analysis

Material	SM45C
Laser Heat Source	3mm
Laser Power	319W
Turning Speed	24rpm
Convection Heat	11.2 W/m ² °C
Analysis Range	0~90°

Table 2 Properties of SM45C

Temperature [K]	Thermal Conductivity [W/mm · K]	Specific Heat [J/Kg · K]
300	0.016	522
500	0.018	544
700	0.020	570
900	0.023	588
1100	0.024	618
1300	0.026	621
1500	0.028	619

SM45C 의 경우 소재의 온도 증가에 따라 열전도율과 비열이 비선형적으로 변화하게 되므로 정확한 열해석을 하기 위해서는 이 두 가지 조건을 모두 고려해야 한다. Table 2 는 소재의 열전도와 비열을 보여준다.

2.2 열해석 방법

사각형재의 레이저 예열 선삭은 소재가 회전함에 따라 레이저 열원의 형상이 회전축을 따라 연속적으로 변형되면서 가공 부위를 가열하게 된다. 수치적 계산 방법에서는 회전에 따른 레이저 열원의 변형 형상을 각도마다 계산하여 열원의 모양을 예측하고 해석 소프트웨어에 입력하였다. 이 방법은 소재의 모든 회전각에 대한 수치 계산을 직접 해야 하므로 매우 복잡하고 시간이 오래 걸리는 단점이 있었다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 레이저 열원은 항상 사각형재의 중심점을 향하여 조사하는 고정점을 고려하여 레이저 열원 투영법을 제안하였다.

Fig. 3 과 같이 최초 예열 시에는 회전각도가 0° 이므로 소재의 중심점으로부터 Y 축 방향으로 표면을 향해 레이저 열원을 투영시키면 정사각형 면적 A 인 열원이 생기게 된다.

Fig. 4 는 회전각이 증가함에 따라 변화하는 레이저 열원의 형상을 보여준다. 최초 Y 축으로부터 소재가 θ 만큼 회전함에 따라 회전한 Y'축을 설정하고, 새로운 회전축 Y'축 방향으로 표면을 향해 투영되는 열원을 구하면 레이저 열원의 면적을 정확하게 구할 수 있다.

이러한 레이저 열원 투영법을 사용하면 소재의 모든 회전각도에 대한 열원 면적 변화를 직접 계

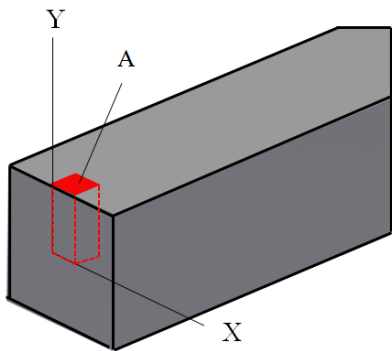


Fig. 3 Shape of the laser beam by the projection method ($\theta=0^\circ$)

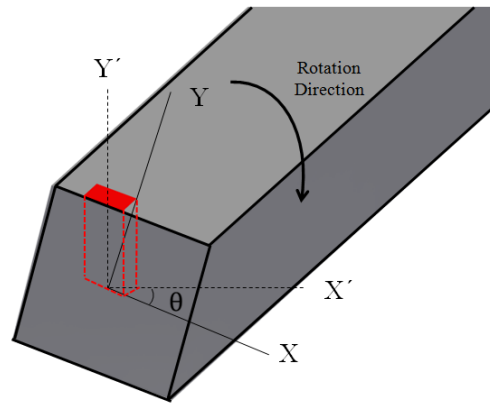


Fig. 4 Change in the shape of the laser beam according to the rotation of the workpiece

산하지 않기 때문에 수치적 계산 방법과 비교하면 해석의 편의성 증대 및 해석 시간 감소 효과를 가져올 수 있다.

회전각도가 45° 일 경우 레이저 열원을 투영시키면 Fig. 5 와 같이 꼭지점을 중심으로 레이저 열원이 나누어지게 된다. 회전이 계속됨에 따라 레이저 열원은 회전축을 따라 계속적으로 변형된다.

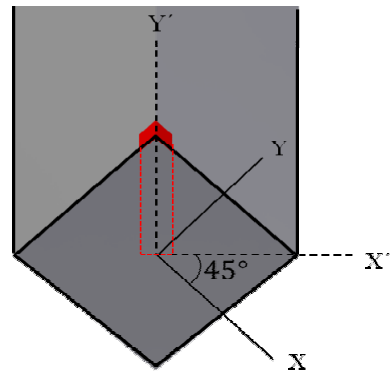


Fig. 5 Shape of the laser beam around the vertex of the workpiece

3. 유한요소해석

3.1 레이저 열원 투영법을 이용한 해석

SM45C 사각형재의 회전에 따른 열 해석을 위해 상용 해석 프로그램인 ANSYS Workbench V12 를 사용하였다. 열해석을 위해서 사각형재에 대한

모델링 수행, 재료 물성치 입력, 레이저 열원 투영법에 따른 열원 모델링, 경계조건 부여, 유한요소 해석의 과정으로 진행되었다. 소재의 회전에 따라 레이저 열원이 이동하면서 소재의 표면에는 급격한 온도 변화를 겪는다. Fig. 6 과 같이 전체적으로 1mm 의 크기로 요소를 분할하였고, 레이저 열원의 조사부에는 0.5mm 크기로 조밀한 요소 분할을 하였다. 유한요소모델의 총 요소(element) 수는 74,363 개, 총 절점(node) 수는 253,732 개 이다.

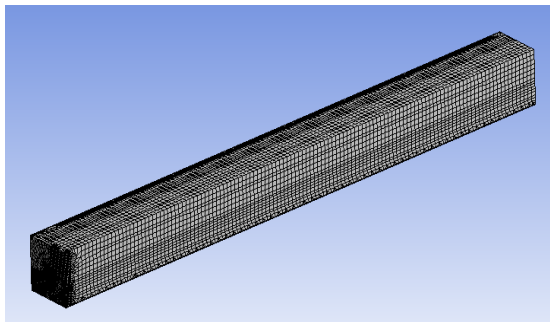
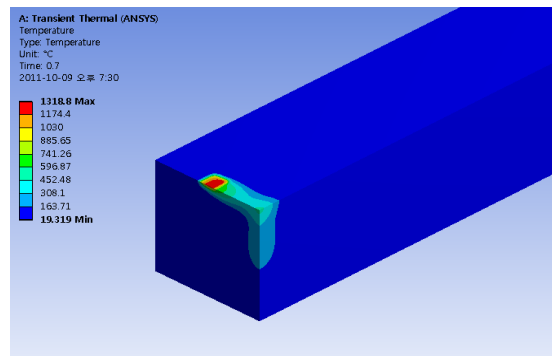


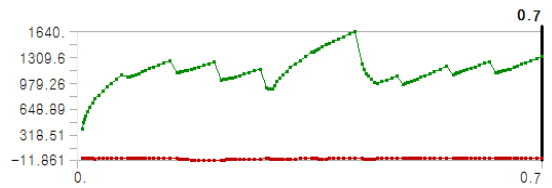
Fig. 6 Finite element model of square bar

Fig. 7(a)는 최종 예열 후인 90° 에서의 결과를 보여주며 최고 온도 분포는 1318.8°C로 나타났다. Fig. 7(b)는 0~90° 까지 소재가 회전함에 따른 최고 온도를 나타낸다. 최초 레이저 예열을 하게 되면 레이저 출력에 의한 열전도가 시작되어 0~20° 까지는 조사부의 온도가 급격하게 상승한다. 그리고 소재의 회전이 계속됨에 20~50° 까지는 온도가 점점 감소함을 알 수 있었다. 이는 회전방향으로 레이저 열원의 형상이 늘어나 정사각형에서 직사각형으로 변하기 때문에 에너지 밀도가 점점 감소하기 때문이다. 소재의 회전각이 50° 이상을 지나면서 온도는 급격하게 상승하기 시작하고, 50~60° 부근인 꼭지점 근처에서 최고 온도인 1640°C로 나타났다. 이 회전각에서는 레이저가 소재의 모서리에 투영되고 레이저의 열원이 집중되기 때문에 급격한 온도상승이 발생하게 된다.

Fig. 8 은 45° 에서의 열해석 결과를 보여준다. 꼭지점을 지나면서 60° 이상을 지나면서 온도는 급격히 온도가 감소하다가 70~90° 에서는 열원의 형상이 점점 직사각형에서 정사각형으로 변하면서 온도가 상승하게 된다.



(a)



(b)

Fig. 7 Thermal analysis of square bar

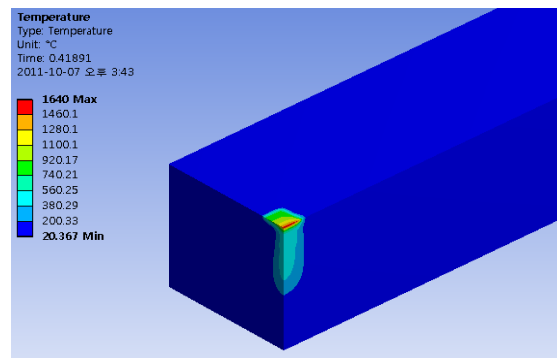


Fig. 8 Thermal distribution of square bar at vertex

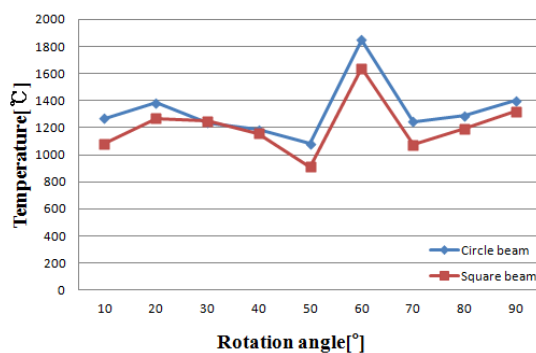


Fig. 9 Comparison of the numerical method and the proposed method

3.2 수치적 계산 방법과의 비교

Fig. 9는 수치적 계산 방법의 원형 레이저 열원의 온도 예측 결과와 본 연구에서의 투영법을 이용한 정사각형 형상의 레이저열원에 의한 결과를 비교한 것이다. 최대 온도는 회전각도가 약 60° 일 때 꼭지점 부위에서 발생하였다. 수치적 계산 방법에 의한 해석의 경우 1850.8℃로 나타났으며, 본 연구에서의 경우는 1640℃로 약 210.8℃정도 낮았다. 그 이유는 수치적 계산 방법에 의한 해석의 경우는 레이저 예열 열원 형상을 원형으로 고려하여 에너지 밀도가 중앙에만 집중하기 때문에 더 높은 온도가 발생한다. 그러나, 본 연구에서의 정사각형의 레이저 열원은 에너지 밀도가 균일하게 분포되므로 다소 낮은 온도가 발생한 것으로 판단된다.

전체적인 경향은 소재가 회전함에 따라 0~50°까지는 온도가 점점 감소하다가 50~60°일 때 급격히 상승하여 60°일 때 꼭지점 근처에서 최고의 온도를 나타낸다. 꼭지점을 지난 후에는 60~70°에서 온도가 급격히 감소하며 70~90°에서는 온도가 다시 점점 증가함으로써 수치적 계산 방법의 연구와 본 연구의 정사각형 열원은 일치하는 경향을 보였다.

4. 결론

회전에 따른 레이저 열원의 변형 형상을 각도마다 계산하여 열원의 모양을 예측하고 입력하는 방법을 개선하기 위하여 레이저 열원 투영법을 제안하였다. 제안된 방법에 의해 사각형체의 레이저 예열 선삭에서 정사각형 형상 레이저 열원의 투영법에 따른 열해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 정사각형 열원이 직사각형 열원으로 변화함에 따라 소재 표면의 온도는 감소하며, 다시 정사각형 열원이 되면서 소재 표면의 온도는 증가하였다.

2) 수치적 계산 방법과 비교 시 최고 온도 분포는 같은 위치인 꼭지점 부근에서 발생하였으며, 원형 형상의 레이저 열원은 에너지 밀도가 중앙에 집중되어 최고 온도가 모서리 부분에서 1850.8℃로 나타났고, 정사각형 형상의 레이저 열원은 균일한 에너지 밀도에 의해 최고온도가 1640℃로 약 210.8℃정도 낮았다.

3) 회전에 따른 예열 온도분포의 전체적인 경

향은 원형 형상과 정사각 형상이 일치함으로써 투영법에 의한 온도 예측의 타당성을 확인하였다.

본 연구의 결과는 다양한 형태의 각형체 레이저 예열 선삭에서 레이저 열원 해석에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0017407).

참고문헌

1. Kim, K. S., Kim, J. H., Choi, J. Y. and Lee, C. M., "A Review on the Laser Assisted Turning Assisted Turning and Heat Treatment," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 12, No. 4, pp. 753-759, 2011.
2. Jeon, M. K., Kim, W. B., Han, G. C. and Na, S. J., "A Study on analysis of heat flow in laser brazing," The Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 96-105, 1995.
3. Kim, K. W., Jo, H. Y., Lee, J. H. and Suh, J., "Thermal analysis for surface hardening of SM45C by diode laser with different beam profiles," Proc. of Korean Society of Laser Processing Spring Conference, pp. 48-52, 2008.
4. Cho, H. Y., Jung, S. Y., Kim, M. H., Jo, C. Y., Lee, C. Y. and Suh, J., "Finite element analysis of electron beam welding considering for moving heat source," Korean Society of Laser Processing, Vol. 4, No. 1, pp. 21-28, 2001.
5. Lee, J. H., Shin, D. S., Cho, H. Y. and Kim, K. W., "Trends of laser integrated machine," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 9, pp. 20-26, 2008.
6. Dumitrescu, P., Koshy, P., Stenekes, J. and Elbestawi, M. A., "High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel," International Journal of Machine Tools and Manufacturing, Vol. 46, No. 15, pp. 2009-2016, 2006.
7. Kim, S. W., Lee, J. H., Seo, J. and Shin, D. S., "Turning of Si3N4 ceramics preheated by Laser," Proc. of Korean Society of Mechanical Engineering

- Spring Conference, pp. 2277-2282, 2007.
8. Rebro, P. A., Shin, Y. C. and Incropera, F. P., "Design of operating conditions for crackfree laser-assisted machining of mullite," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 7-8, pp. 677-694, 2004.
 9. Zhang, C. and Shin, Y. C., "A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 7, pp. 825-835, 2002.
 10. Noh, J. H., Suh, J., Sohn, H. K., Shin, D. S. and Lee, J. H., "Fabrication of Superhydrophobic mold surface using laser ablation," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference*, pp. 791-792, 2008.
 11. Kim, S. W. and Yang, C. J., "Magnetic Properties of SmCo Thin Films Grown by Using a Nd-YAG Pulsed Laser Ablation Method," *Journal of Korean Magnetism Society*, Vol. 10, No. 1, pp. 31-36, 2000.
 12. Kim, J. D., Kil, B. L. and Kang, W. J., "Surface Transformation Hardening for Rod-shaped Carbon Steels by High Power Diode Laser," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 31, No. 8, pp. 961-969, 2007.
 13. Jung, J. W. and Lee, C. M., "A Study on the Cutting Tool and holder Deformation Prediction undergoing Laser-assisted Machining with Moving Heat Source," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 9 pp. 127-137, 2009.
 14. Kim, D. H., "Laser Processing," *Kyoungmoon*, pp. 265-284, 2005.
 15. Ahn, S. H. and Lee, C. M., "A Study on Large-area Laser Processing Analysis in Consideration of the Moving Heat Source," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 2, pp. 285-292, 2011.