

이동열원을 고려한 레이저 보조가공에서 절삭공구와 홀더의 변형 예측에 관한 연구

A Study on the Cutting Tool and Holder Deformation Prediction undergoing Laser-assisted Machining with Moving Heat Sources

정재원¹, 이춘만^{2,✉}
Jae Won Jung¹ and Choon Man Lee^{2,✉}

¹ 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design, Changwon Univ.)

² 창원대학교 데카트로닉스공학부 (Department of Mechatronics, Changwon Univ.)

✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Manuscript received: 2009.2.25 / Revised: 2009.6.8 / Accepted: 2009.7.27

Laser-assisted machining uses primarily laser power to heat the local area before the material is removed. It not only efficiently reduces the cutting force during the manufacturing process but also improves the machining characteristics and accuracy with regard to difficult-to-machine materials. The prediction of relative deformations between the cutting tool and workpiece is important to improve the accuracy of machined components. This paper presents the deformation errors caused for a cylindrical workpiece by thermal effects in the laser-assisted machine tool using finite element method. The results can be used to increase the cutting accuracy by compensating thermal distortion prior to laser-assisted machining.

Key Words: Laser-assisted Machining (LAM, 레이저 보조가공), Deformation (변위), Accuracy (정도), Finite Element Method (FEM, 유한요소해석)

1. 서론

레이저 보조가공은 가공이 일어나기 전 한 지점을 연화시키는 방법으로 매우 높은 강도의 응집성을 가지며 쉽게 자동화가 가능해 최근 산업전반에서 각광 받고 있다.^{1,2} 그리고 높은 가공 속도와 많은 제조 공정에서 우수한 품질, 새로운 설계의 유연성 등을 가지나 많은 투자비용을 필요로 한다. 하지만, 여러 분야에 적용이 가능한 장점은 이를 충분히 보완가능하다.³ 또한 난삭재 제품의 요구가 증가함에 따라 고출력의 레이저를 가공에 연계하는 많은 연구가 이루어지고 있으며,⁴ 넓은 영역에서 소재의 가공이 가능하고 높은 생산성, 공정의

감소, 자동화, 제조 비용의 절감, 뛰어난 품질, 비접촉 가공, 친환경, 열영향부(HAZ : heat-affected zone)가 매우 작은 장점 때문에 가공에 연계한 레이저 사용에 대한 관심이 증가하고 있다.⁵

레이저 보조가공 영역은 금속, 합금뿐만 아니라 비철금속, 비금속 등에도 적용 가능한 넓은 가공 영역을 가진다.⁶ Nd:YAG 레이저 빔은 CO₂ 레이저에 비해 흡수율이 높아서 효율적인 가공이 가능하며 적절한 제어를 통해 우수한 품질과 뛰어난 조도를 가지는 가공품 생산을 가능하게 한다.⁷ 레이저 보조가공은 절삭 공정과 국부적인 레이저 가열 공정이 동시에 일어난다. 따라서 절삭 공정과 국부적인 레이저 가열 공정에 의해 발생한 절삭열

과 절삭력 등이 변형 오차에 영향을 미치게 된다. 변형 오차를 예측하기 위해 두 가지 열원으로부터 열영향이 동시에 고려되어야 한다.

선반 레이저 보조가공 시 레이저에 의한 열과 절삭열에 의한 열변형을 예측하기 위해 본 논문에서는 레이저 보조가공에 적용할 수 있도록 3 가지 해석 단계를 고려 하였다. 첫 번째 단계는 레이저 이동열원에 의한 절삭면에서의 온도 분포를 예측하는 것이다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계의 온도 분포를 이용하여 절삭력과 가공열을 구하게 되며, 마지막 세 번째 단계에서는 두 번째 단계의 절삭력과 가공열을 이용하여 열변형을 예측하는 것이다.⁸

본 논문에서는 이전 연구에서 제시한 방법⁸을 이용하였고, 해석 공정이 실제 공정에 근접할 수 있도록 실제 공정에 사용되는 절삭공구, 소재, 가공조건 등을 이용하였다.

유한요소해석에서 레이저 이동열원 모델링 시 이동열원을 좀더 연속적으로 고려하기 위해 본 연구자에 의해 제시한 방법⁸보다 더 많은 열원으로 나누었다. 그리고 절삭 해석에서 기존 2D 에서 3D 방법을 이용하였으며, 알루미늄과 지르코니아 소재와 직경을 변화시켜 해석을 수행하였다.

공구변형에 대한 예측 결과는 레이저 보조가공 전에 열변위를 보정함으로써 절삭 정도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 레이저 보조가공

2.1 레이저 보조가공 모델

Fig. 1 은 레이저 보조가공의 개념도를 보여준다. 개념도에서는 레이저 가열 위치로부터 절삭면의 위상을 나타내며, Fig. 1 의 경우는 90°의 차이를 보이며 레이저를 뒤따라간다. 유한요소해석 시에는 레이저 가열 위치로부터가 180°, 90°, 45°인 절삭면의 위치를 고려하였다.

Table 1 은 본 논문의 해석에 고려된 레이저의 사양을 나타내며, 레이저 빔은 절삭면에서 절삭이 일어나기 전 소재를 가열하여 연화에 의해 난삭재의 절삭이 가능하도록 하기 위해 사용된다. 한편, 가우시안 빔의 프로파일과 에너지 분포수식을 이용하여 레이저 출력을 구하였다.

2.2 레이저 보조가공 해석 방법

실제 레이저 보조가공 공정의 단계들과 같이

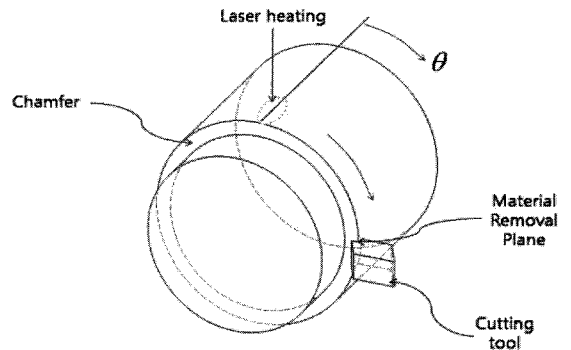


Fig. 1 Laser-assisted machining of a cylindrical workpiece

Table 1 Laser specifications

Mode	TEM ₀₀
Profile diameter	3mm
Power	319W

레이저에 의해 가열될 때의 절삭면 온도를 구하고, 절삭면에서 절삭에 의해 발생하는 절삭력과 가공열을 구한 후 이를 입력하여 절삭공구에 발생하는 변형량을 예측한다.⁸

해석 방법은 크게 아래와 같이 세 단계로 구성 된다.

1 단계: 유한요소 상용 해석 프로그램인 Simdesigner 에서 레이저의 이동열원을 고려하여, 이동열원 뒤를 따라 가공되는 절삭면의 평균 온도 분포를 구한다.

2 단계: 절삭 상용 해석 프로그램인 AdvantEdge 에서 1 번 단계에서 구해진 평균 온도 분포를 입력하고 절삭 시 가공 조건을 고려하여 공구에서 발생하는 절삭열과 절삭력을 구한다.

3 단계: 2 번 단계에서 구한 절삭열과 절삭력을 입력하여 이들에 의해 절삭공구에서 발생하는 변위를 Simdesigner 를 이용하여 예측한다.

3. 유한요소모델

3.1 해석 1 단계

해석 1 단계에서는 레이저의 이동열원에 의한 절삭면의 온도 분포를 구하기 위해 Simdesigner 를 통해 유한요소를 모델링 하였다. 메시의 정보는 Table 2 에 나타나며, Ø16mm 의 소재에 메시가 적용된 모습을 Fig. 2 에서 보여준다. 원통 형상의 시

편 직경은 $\varnothing 16\text{mm}$ 와 $\varnothing 30\text{mm}$ 이며 소재의 회전 속도는 440rpm 이며 가공기 내 대기 중의 열대류 계수는 $11.2\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ 으로 고려하였다.

Table 2 Mesh information of a cylindrical workpiece

	$\varnothing 16\text{mm}$	$\varnothing 30\text{mm}$
Mesh type	Hexahedron	
Mesh size[mm]	0.5 x 0.5 x 0.67	
Elements number	66,300	101,700
Node number	70,516	108,035

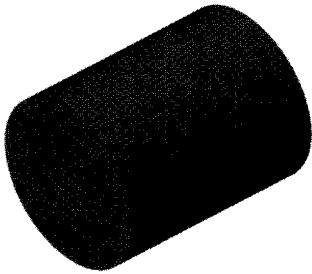


Fig. 2 Mesh of a cylindrical workpiece

이동열원을 고려하기 위해 $\varnothing 16\text{mm}$ 에서는 22.1m/min 의 이동속도가 고려되었으며, 과도해석에서 사용된 시간 스텝은 0.002s, 총 시간은 0.073s 으로 고려되었다. $\varnothing 30\text{mm}$ 에서는 회전속도는 41.5m/min, 스텝은 0.002s, 총 시간은 0.067s 로 고려되었다.

$\varnothing 16\text{mm}$ 모델에서는 Fig. 3 과 같은 방법으로 이동열원을 입력하였다. 총 16 개의 열원이 서로 반씩 겹치도록 모델링하였으며, 각 열원의 시간에 따른 열원의 비율을 보여주고 있다. $\varnothing 30\text{mm}$ 의 경우에는 직경증가로 인해 32 개의 열원을 이용하였으며 시간에 따른 열원 크기의 비율과 열원 입력 방법은 Fig. 3 과 동일하다.

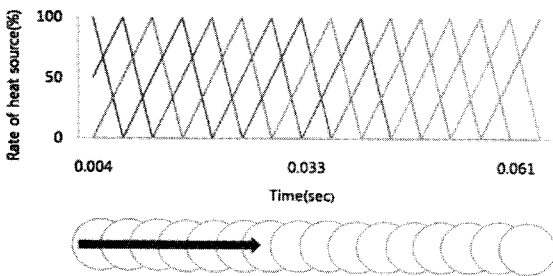


Fig. 3 A transient analysis conditions

사용된 소재는 세라믹계인 알루미나와 지르코니아이며 해석에 사용된 물성치는 Table 3 과 Fig. 4 에 나타내고 있다.⁹⁻¹³

Table 3 Material properties of a cylindrical workpiece

	Alumina	Zirconia
Young's modulus [GPa]	393.0	196.1
Poisson's ratio	0.25	0.30
Density [kg/m^3]	3,970.0	6,050.0

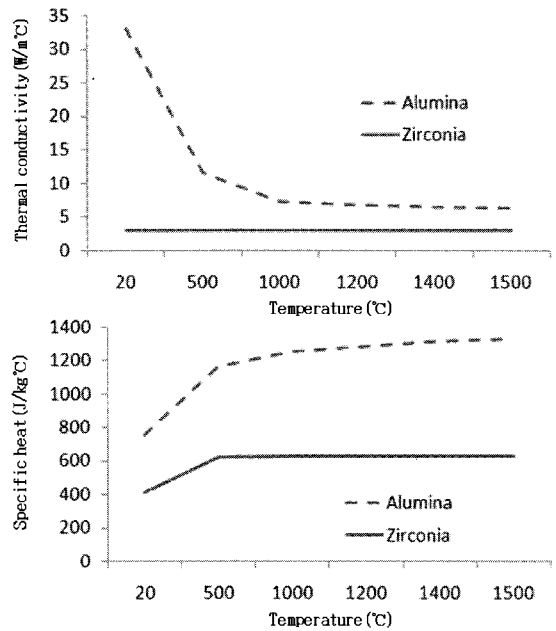
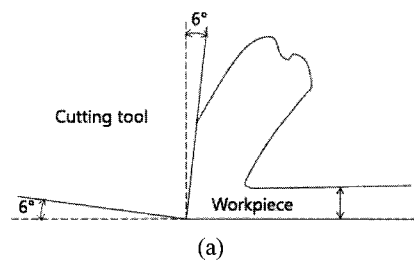


Fig. 4 Temperature-dependent specific heat and thermal conductivity

한편, 해석 1 단계의 과도해석은 Simdesigner 의 MSC. Marc 솔버를 이용하여 수행된다.

3.2 해석 2 단계



(a)

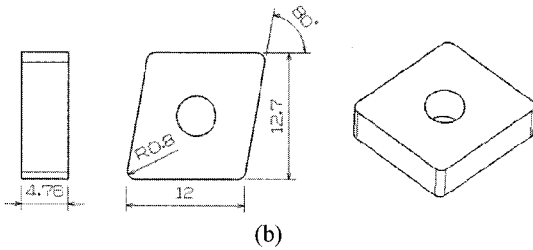


Fig. 5 Back rake, relief angle and geometry of a cutting tool

해석 2 단계에서는 AdvantEdge 에서 3D 선반 해석을 이용하였으며, 네가티브 인서트로 -6°의 상면경사각과 6°의 여유각을 가지며 형상과 크기는 대구택의 CNMA 120408 을 참조하였다. 이를 Fig. 5 에서 나타내고 있다.

Table 4 Cutting conditions

Feed[mm/rev.]	0.013	
Depth of cut[mm]	0.89	
Length of cut[mm]	3	
Cutting speed[m/min]	Ø16mm	Ø30mm
	21.7	41.5
Initial temperature [°C]	The results of step 2	

Table 5 Mesh information of the analysis step 2

Minimum element edge length (chip bulk)[mm]	0.060
Minimum element edge length (cutter edge)[mm]	0.050
Radius of refined region (cutter edge)[mm]	0.23
Max. number of nodes	100,000
Mesh type	Tetrahedron

Table 4 에서는 해석 2 단계에서의 절삭조건을 보여주며, 이용된 메시 정보는 Table 5 에 나타내고 있다.

3.3 해석 3 단계

CATIA V5 를 이용하여 나누어진 메시의 모습과 3D 모델링된 절삭공구의 모습은 Fig. 6 에서 보여주고 있다. 홀더의 형상은 대구택의 PCLNR/L 2525 M09 를 참조하여 모델링하였다.

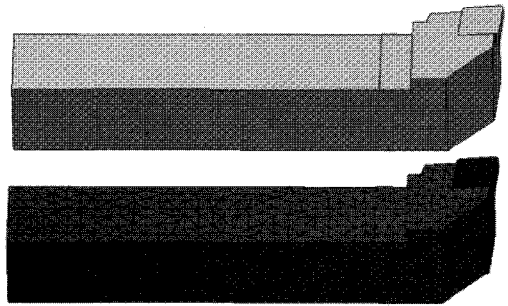


Fig. 6 3D model and mesh of the cutting tool

Table 6 Mesh information of the cutting tool

Mesh type	Tetrahedron (Parabolic/10node)	
	Insert	Holder
Mesh size[mm]	1	4
Elements Number	8,831	
Node Number	14,542	

Table 7 Material properties of the cutting tool

	SAE4140 [holder]	WC-Co [insert]
Young's modulus [GPa]	205	620
Poisson's ratio	0.29	0.22
Density [kg/m3]	7,861	14,700
Thermal conductivity [W/m-°C]	33	100
Specific heat [J/kg-°C]	560	138.16
Thermal expansion coefficient [K ⁻¹]	12.2 × 10 ⁻⁶	5.0 × 10 ⁻⁶

절삭공구의 메시 정보는 Table 6 에서 보여주고 있으며, Table 7 은 톨 홀더와 인서트의 물성치를 보여주고 있다.¹⁴ 인서트의 경우 대부분이 초경으로 이루어져 있으며, 초경에 비해 극소로 작은 부분으로 이루어진 CBN 팁은 해석 3 단계에서 고려하지 않았다.

해석 3 단계에서는 Simdesinger 의 열해석 워크벤치를 이용하여 온도 분포를 구하고, 이를 바탕으로 Simdesinger 의 구조해석 워크벤치에서 절삭력과 열에 의한 절삭공구의 마찰이 일어나는 지점의 인서트 부에서의 변형량을 구한다. 한편, 열해석은 Simdesinger 의 MSC. Marc 솔버, 구조 해석은 MSC. Nastran 솔버를 이용하여 수행된다.

4. 유한요소해석 결과

4.1 해석 1 단계의 결과

레이저 이동열원에 의한 절삭면의 온도 분포를 구하기 위해서 같은 방법으로 알루미늄과 지르코니아 Ø16mm, Ø30mm 에 대한 해석을 각각 수행하였다.

Fig. 7 은 해석 1 단계에서의 알루미늄 소재의 Ø16mm 실린더에 대한 레이저 이동열원의 과도해석 결과를 보여주며 이동열원의 최대 온도는 786.8℃를 보였다.

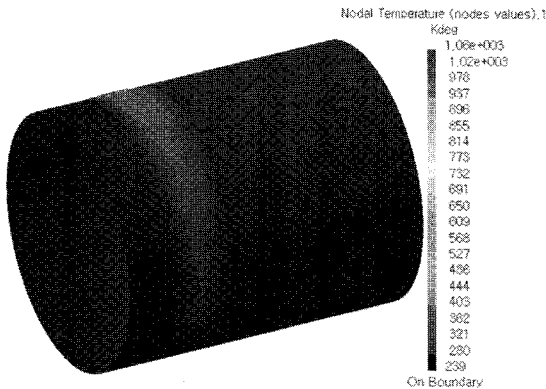


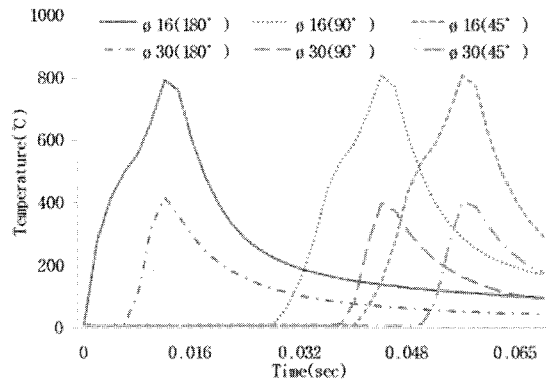
Fig. 7 Temperature distribution by the analysis step 1 (Alumina, Ø16mm)

Fig. 8 에서는 레이저 열원으로부터 180°, 90°, 45° 떨어진 절삭면의 시간에 따른 평균 온도 (MEAN TEMPERATURE)의 변화를 보여주고 있다. 평균 온도는 열원으로부터 떨어진 각 위치에 분포된 3mm 이내의 노드점들의 평균값을 나타낸다.

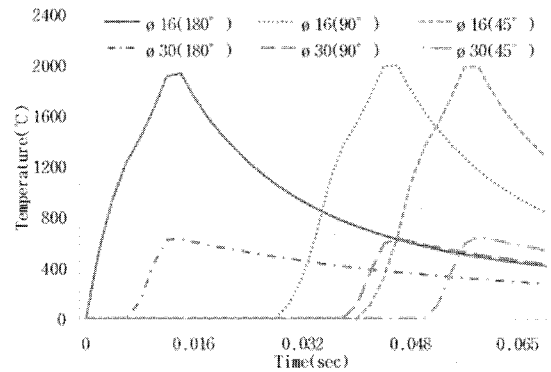
각 그래프 변화에서 가장 높은 온도를 보일 때가 각 위치에서 열원이 통과할 때이고, Fig. 8 에서 그래프의 변화가 끝나는 지점에서의 온도가 열원으로부터 떨어진 절삭면의 평균 온도를 나타낸다. 이 절삭면의 평균 온도를 Table 8 에서 소재와 직경에 따라 나타내고 있다.

Fig. 8 에서 이동열원이 시간에 따라 180°, 90°, 45° 순으로 최고 온도를 보이며 지나간다. 그리고 지르코니아가 열전도율과 비열이 알루미늄에 비해 작으므로 알루미늄보다 높은 온도분포를 형성하며 곡선이 완만하다.

Table 8 에서는 전체적으로 180° 위치가 열원으로부터 가장 멀리 떨어져 있기 때문에 평균 온도



(a) Alumina



(b) Zirconia

Fig. 8 Temperature variations of 180°, 90°, 45° planes from the laser heating

Table 8 Mean temperature at material removal planes

Location from the laser heating		Mean temperature[°C]	
		Ø16mm	Ø30mm
Alumina	180°	97.3	44.0
	90°	170.5	96.2
	45°	293.2	177.8
Zirconia	180°	421.8	284.2
	90°	843.4	468.1
	45°	1281.4	547.1

가 가장 낮게 나왔고 열원과 가까운 45° 위치에서 가장 높은 온도가 발생함을 알 수 있다.

알루미늄과 지르코니아 등 세라믹스계는 난삭재이지만 1000℃정도가 되면 경도가 감소하기 시작하여 그 이상의 고온에서는 급격한 온도 감소가 발생하는 것으로 알려져 있다.¹⁵ 이를 만족시키기

위해서는 실린더 모양 소재의 직경이 클수록 높은 레이저 출력이 필요하며, 알루미늄의 경우에는 레이저 보조가공을 위해서는 지르코니아보다 높은 레이저 출력이 필요함을 확인할 수 있다.

해석 1 단계에서 구해진 절삭면의 평균 온도는 가공 해석을 수행하는 해석 2 단계의 초기 온도로 이용된다.

4.2 해석 2 단계의 결과

Table 8 에서 알루미늄의 경우에는 1000℃이하 이므로 해석 2 단계에서는 고려하지 않았다. AdvantEdge 의 입력 가능한 최대 초기 온도가 1000℃로 제한되어 있기 때문에 Ø16mm 인 지르코니아 시편에 대해 1000℃를 초과하지 않고 1000℃에 근접한 온도가되는 58°의 절삭면을 택하여 계산된 결과 988.2℃를 얻었고, 이를 해석 2 단계의 초기온도로 사용하였다.

Fig. 9 는 해석 2 단계의 절삭 시뮬레이션 모습을 보여주며, 이 시뮬레이션은 가공 중에 발생하는 절삭력과 최고 온도를 구하기 위해 수행되었다.

최고 온도(PEAK TEMPERATURE)는 해석 1 단계에서 노드점들의 3mm 내의 온도 분포의 평균값인 평균 온도와 해석 2 단계에서 예측된 절삭열을 합한 값을 나타낸다.

Fig. 10 은 AdvantEdge 를 이용하여 구해진 최고 온도의 변화를 보여준다.

최고 온도는 1250.1℃로 평균 온도 988.2℃보다 261.9℃높은 온도를 보였다. 이는 가공 중에 발생하는 절삭열의 효과가 더해졌기 때문으로 보인다. 그리고 절삭력은 x, y, z 방향으로 각각 115.2N, 45.9N, 16.1N 을 나타냈다.

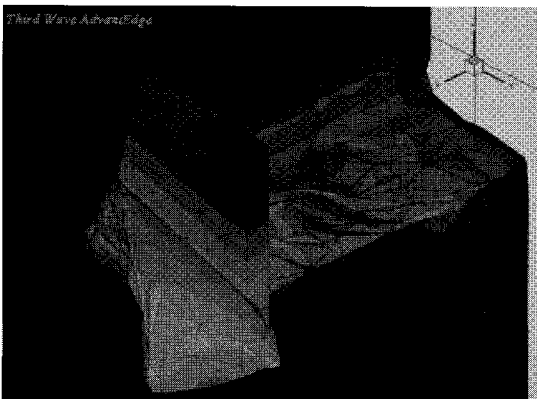


Fig. 9 A cutting simulation

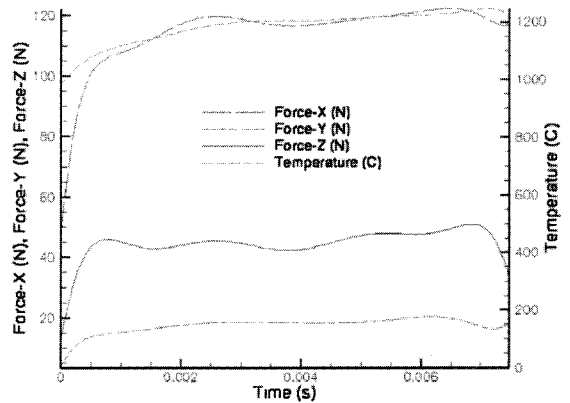


Fig. 10 Peak temperature variations and forces by mean temperature 843.35℃

Purdue University 의 실험을 보면 300W, 55° 위치의 절삭면에서 약 1400℃의 온도 분포를 보이고 있다.¹⁶ 이와 비교하여 해석 2 단계의 319W, 58° 위치에서는 1250.1℃로 출력과 절삭면의 위치는 다소 차이가 있지만, 10.7% 낮은 온도가 나왔다. 이는 해석 1 단계에서, 실제 가공에서는 긴 시간 동안 이동열원이 대면적에 가열되기 때문에 해석보다 소재의 전체 온도가 높게 나오는 것으로 생각된다. 하지만 실제 공정처럼 대면적을 유한요소해석에 적용시키기에는, 과도한 해석 용량과 시간 때문에 어려움이 있었다.

해석 2 단계에서 구해진 최고 온도와 절삭력은 해석 3 단계에서 입력값으로 사용된다.

4.3 해석 3 단계의 결과

Fig. 11 은 해석 2 단계에서 구해진 결과를 입력한 후 Simdesigner 을 이용하여 절삭공구와 홀더의 열변위 모습을 나타내고 있다.

소재와 접촉하는 인서트 팁 부분에 해석 2 단

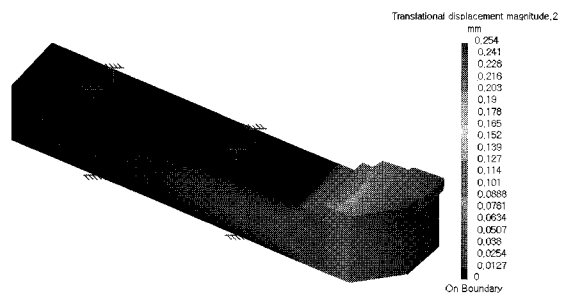


Fig. 11 Deformations of the cutting tool

계의 최고 온도를 입력하여, 이에 따른 온도 분포를 구하였다. 그리고 구해진 온도 분포와 해석 2 단계의 절삭력을 입력하고, 홀더 클램프 부를 고정 후 홀더와 인서트 팁에서 발생하는 열변위를 구하였다. Fig. 11 과 같이 소재와 마찰이 일어나는 인서트의 끝단에서 최대 변위 0.254mm 가 발생함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문의 목적은 레이저 가공열과 절삭열에 의한 열변형을 유한요소해석 프로그램을 이용하여 예측하는 것이다. 이를 예측하기 위해 선반 가공 시 실제 레이저 보조가공 공정에 근접하도록 3 단계의 해석 과정을 제시하였다. 해석 1 단계에서는 레이저가 소재에 가열되는 공정을 통해 절삭면의 온도 분포를, 2 단계에서는 1 단계에서 구해진 온도 분포를 고려한 절삭 공정에서의 절삭열과 절삭력, 3 단계에서는 2 단계에서 절삭열과 절삭력을 고려하여 절삭공구와 홀더에서 발생하는 열변형을 예측하였다.

1) 알루미늄과 지르코니아를 동일한 조건에서 이동열원을 고려한 유한요소해석을 수행한 결과, 알루미늄이 지르코니아보다 낮은 온도 분포를 보였다. 알루미늄의 경우 지르코니아보다 높은 레이저 출력이 있어야, 레이저 보조가공을 위한 온도 분포를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

2) 지르코니아의 직경이 $\varnothing 16\text{mm}$ 일 경우 레이저 열원으로부터 58° 뒤를 따라가는 절삭공구와 홀더에서 소재와 마찰이 일어나는 끝단에서 0.254mm의 최대 변위가 발생하였다.

3) 본 논문의 결과는 레이저 보조가공 전에 열변위를 보정함으로써 절삭 정도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업 [RTI04-01-03] 과 지역산업기술 개발 사업인 "레이저 복합가공기 개발" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Steen, W., "Laser Material Processing," Kyungmoon, pp. 265-284, 2005.
2. Lee, J. H., Shin, D. S., Suh, J., 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.
3. Anderson, M., Patwa, R. and Shin, Y. C., "Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, No. 14, pp. 1879-1891, 2006.
4. Kuar, A. S., Doloi, B. and Bhattacharyya, B., "Modelling and analysis of pulsed Nd:YAG laser machining characteristics during micro-drilling of zirconia(ZrO₂)," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, No. 12-13 pp. 1301-1310, 2006.
5. Bagger, C. and Olsen, F. O., "Pulsed mode laser cutting of sheets for tailored blank," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, No. 1, pp. 131-135, 2001.
6. Meijer, J., "Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, No. 1-3, pp. 2-17, 2004.
7. Kuar, A. S., Doloi, B. and Bhattacharyya, B., "Experimental investigations on Nd:YAG laser cutting of silicon nitride," International Journal of Manufacturing Technology and Management, Vol. 7, No. 2-4, pp. 181-191, 2005.
8. Jung, J. W. and Lee, C. M., "Cutting temperature and laser beam temperature effects on cutting tool deformation in laser-assisted machining," International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Vol. 2, pp. 1817-1822, 2009.
9. Kim, B. G. and Cho, J. R., "Finite Element Analysis of Ni/Al₂O₃ Heat-Resisting Functionally Gradient Composites," Journal of the KSME, Vol. 2, No. 1, pp. 458-463, 1988.
10. Kim, Y. S., "A Study on the Mechanical Properties and Residual Stresses of the Thermally Sprayed Alumina Ceramic Coating Layer," The Journal of the Korea Society of Oceanography, Vol. 10, No. 2, pp. 88-97, 1996.
11. Kim, J. D., "A Study on the Machinability of Ceramics in Zirconia System by Low Temperature Cooling," Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 2, pp.

- 59-70, 1990.
12. Pfefferkorn, F. E., Lei, S., Jeon, Y. H. and Haddad, G., "A metric for defining the energy efficiency of thermally assisted machining," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, No. 5, pp. 357-365, 2009.
 13. Chang, C. W. and Kuo, C. P., "An investigation of laser-assisted machining of Al₂O₃ ceramics planning," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, No. 3-4, pp. 452-461, 2007.
 14. Bauer, C. B., Imspektop, A. and Oles, E. J., "A comparative machining study of diamond-coated tools made by plasma torch, microwave, and hot filament techniques," *Sādhanā*, Vol. 28, Part 5, pp. 933-944, 2003.
 15. 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 & Manufacture*, Vol. 40, No. 15, pp. 2213-2233, 2000.
 16. Pfefferkorn, F. E., Incropera, F. P. and Shin, Y. C., "Heat transfer model of semi-transparent ceramics undergoing laser-assisted machining," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 10, pp. 1999-2012, 2005.