레이저 보조선삭 중 주철환봉 내부의 온도분포 예측에 관한 연구

김관우*, 조해용*, 이제훈**, 서정**, 신동식**
*충북대학교 기계공학부, hycho@cbnu.ac.kr
**한국기계연구원 광응용생산기계연구실

A study for prediction of temperature distribution in laser-assisted turning for rod-shaped cast iron

Kwan-Woo Kim*, Hae-Yong Cho*, Jae-Hoon Lee**, Jeong Suh** and Dong-Sig Shin**
*School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University
**Department of High Density Energy Beam Processing and System, KIMM

Abstract

Laser-assisted machining is dependent on absorbed energy density into workpiece. Generally, the absorptivity of laser beam is dependent on wave length of laser, materials, surface roughness, etc. Various shapes and energy densities for beam irradiation can be used to laser-assisted machining. In this thesis, efficient method of heat source modeling was developed and designed by using one fundamental experimental trials. And then, laser-assisted machining of rod-shaped cast iron was simulated by using commercial FEM code MARC. Simulations and experiments with various conditions were carried out to determine suitable condition of pre-heating for laser-assisted turning process. Temperature distribution of cutting zone could be predicted by simulation.

Keywords: Cast iron, FEM, heat source, Laser assisted machining (LAM), simulation

1. 서 론

레이저 복합가공(LAM)은 레이저 빔을 통해 취성재료의 가공부위를 국부적으로 예열함으로써 재료의 연성을 증가시켜 취성파괴를 억제하고 소성변형에 의해 칩을 형성하는 절삭가공법이다. 가공대상인 난삭재로서 강화흑연주철, 오스테나이트계 스테인리스 강, 금형강 등의 난삭강이 있고, 질화규소, 지르코니아, 뮬라이트, 알루미나 등의 엔지니어링 세라믹이 있다.

열 보조가공(TAM, Thermally Assisted Machining)의 소재예열에는 가스토치[1], 플라즈마[2], 레이저[3-9] 등 다양한 가열방법이 적용되고 있고, 최근 5년 전부터 선삭, 밀링 등의 절삭공정에 레이저를 접목시킨 복합가공에 관한 연구들[3-9]이 주를 이룰 만큼 그 관심은 커지고 있다.

현재까지 난삭재의 레이저 보조선삭에 관한 기초연구들은 주로 국외에서 진행되고 있다. Skvarenina[4] 등은 1.5kW CO_2 레이저를 이용, 조밀흑연주철(CGI)의 예열선삭에 관한 연구에서 절삭속도, 절입깊이, 빔 출력 등의 가공변수에 따른 예열 선삭실험 결과 분석을 통해 적정 가공조건을 제시하였고, 공구수명 및 표면조도 개선효과를 확인하였다. Anderson[5] 등은 CO_2, Nd:YAG 레이저를 접목하여 AISI 304 및 인코넬 718 강 환봉의 예열선삭에 관한 연구를 하였고, 공구수명, 절삭력 등에 대한 예열온도 및 회전속도의 관계를 규명하고자 했다. Dumitrescu[6] 등은 고출력 다이오드 레이저를 이용한 AISI D2 공구강의 예열선삭 실험을 통해 채터링, 공구 파손 및 마모, 절삭력 감소의 효과를 확인할 수 있었다. 최근 국내에서도 CNC 선반에 고출력 다이오드 레이저를 접목한 복합가공기가 개발됨에 따라 관련 기초연구가 진행되고 있다. Shin[7,8] 등은 고출력 다이오드 레이저를 이용한 질화규소의 예열선삭 실험에서 공구 경사각, 빔 출력 및 이송속도, 절입깊이 등에 따른 절삭특성, 절삭력, 공구마모 등을 비교분석하였고 적정 가공 공정 및 조건을 제시하였다. 난삭강의 예열선삭에 관해 Kim[9] 등은 고출력 다이

오드 레이저를 이용한 AISI 304 환봉의 예열선삭에 있어서 적정가공 조건제시를 위해 열 해석을 접목한 기초실험을 하였다.

레이저 보조선삭을 위한 적정 예열조건 설정을 위해서는 레이저와 가공소재 조건에 따른 상호간 열적반응에 대한 온도예측이 매우 중요하다. 이를 위한 열 해석에 있어서 레이저 빔 조사에 따른 소재의 에너지 흡수율의 정확한 적용이 필요하지만 흡수율은 빔의 파장, 재질, 표면 조도 및 상태 등에 큰 영향을 받으므로 문헌조사를 통한 값의 적용이 어렵다. 따라서 다양한 소재와 레이저 빔 조사 조건에 대한 효과적인 흡수율 결정방법이 요구되며, 이에 대한 보다 활발한 해석적 연구가 필요하다.

본 연구에서는 상용유한요소해석 프로그램인 MARC를 이용하여 GC 200 주철의 레이저 예열선삭에 관한 열 해석을 하였다. 입열 경계조건 설정을 위해 1조건의 기초실험 데이터와 레이저 빔 프로파일을 이용, 흡수율이 감안된 나선이동형 표면열원 모델링 방법을 제시하였다. 또한 소재 회전속도에 따른 냉각효율 변화를 해석에 고려하였다. 열 해석을 통해 예열선삭의 소재가열 특성 파악, 절삭부 온도분포 예측 등을 하고자 하였고 기초실험 결과와의 비교분석을 통해 해석적 방법의 타당성을 검토하고자 하였다.

2. 해석 및 실험방법

고출력 다이오드 레이저를 이용한 환봉소재인 GC 200의 예열공정 및 예열선삭 중 소재 내 온도분포 예측을 위한 열 해석과 동일조건의 실험 방법은 다음과 같다.

2.1 해석모델링

Fig. 1은 해석모델을 나타낸 것으로 그 크기는 실험시편과 동일하며 직경 20mm, 길이 150mm이다. 축대칭을 감안하여 1/4모델링하였고 레이저조사부는 원형열원에 의한 입열과 냉각의 급격한 열 이력을 겪음으로 조밀하게 요소 분할하였다. 해석모델은 총 5488개의 요소들과 총 6612개의 절점들로 이루어져 있으며 예열선삭 범위는 27mm이다.

2.2 열원모델링

Fig. 2는 다이오드 레이저 원형빔 조사에 대한 빔 프로파일을 나타낸 것이다. 입열 에너지밀도 분포는 중심부가 평탄한 원뿔대 형상이고 빔 조사반경은 약 3.5mm, 중심부의 평탄부 반경은 약 2.5mm임을 볼 수 있다.

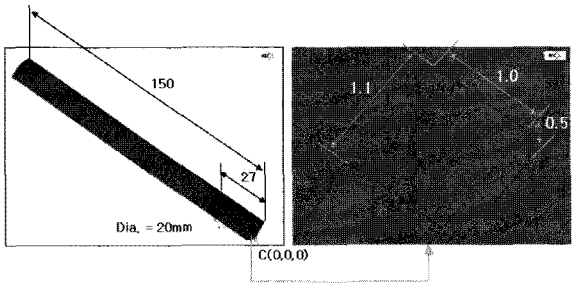


Fig. 1 3D model of rod-shaped specimens.

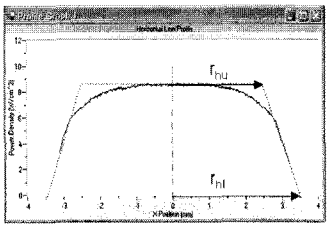


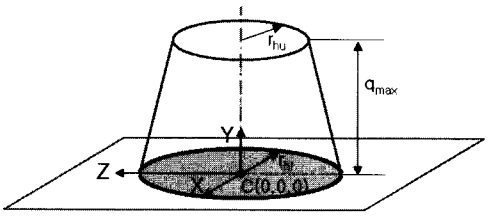
Fig. 2 Beam profile for diode laser irradiation.

Fig. 3(a)는 원뿔대 형상의 표면열원모델을 나타낸 것으로 열원모델의 형상변수 r_{hu}, r_{hl} 값은 Fig. 2의 빔 프로파일로부터 각각 2.5mm, 3.5mm로 결정된다. Fig. 3(b)는 시선방향이 Y축 선상일 때의 열원형상을 나타낸 것으로 그림에서의 점들은 해석모델 표면의 적분점이다. Ⅰ영역의 입열 에너지밀도 값은 $q_{\max}$로 일정하고 Ⅱ영역의 경우는 빔 프로파일의 경사도를 감안한 다음 식으로 그 값을 계산할 수 있다.

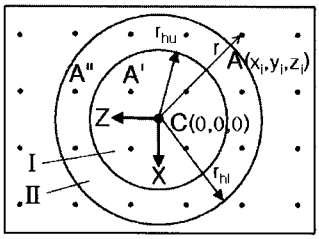
$$q_i = q_{\max}(1-\frac{r-r_{hu}}{r_{hl}-r_{hu}}),\ r=\sqrt{x_i^2+y_i^2+z_i^2} \qquad (1)$$

그림에서 적분점이 A점과 같이 열원 외부에 있는 경우 에너지밀도 값은 서브프로그램의 조건문을 통해 0으로 처리하고, A′점과 같이 Ⅰ영역에 있는 경우 $q_{\max}$값을 적용하며, A′′점과 같이 Ⅱ영역에 있는 경우에는 Eq. (1)을 통해 적용 에너지밀도 값을 결정한다. Fig. 3(c)는 열원의 나선형 이동경로를 나타낸 것으로 소재의 회전속도와 이송속도에 따라 결정되며 경로는 서브프로그램을 통해 정의된다. 최대 에너지밀도 $q_{\max}$값은 1조건의 온도측정실험과 열 해석의 결과를 비교분석하여 결정될 수 있다.

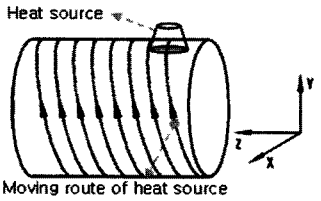
입열과 냉각에 대한 경계조건은 서브프로그램으로 적용되며 열원의 경우 그 크기와 에너지밀도 값이 조절가능하다. 또한 소재의 회전속도와 빔의 Z축 방향 이송속도 변수 값에 따라 이동 경로 및 속도가 결정된다. Fig. 4는 열적경계조건이 적용되는 표면부 범위를 나타낸 것이다.



(a) iso view

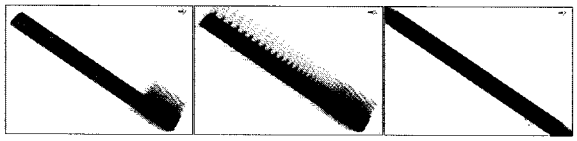


(b) view of ZX plane



(c) moving route of heat source

Fig. 3 2D heat source for diode laser beam.



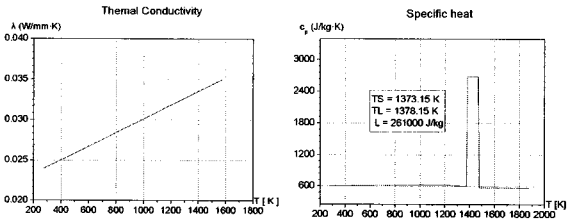
(a) heat inputand radiation (b) convection by convection (c) rotation

Fig. 4 Thermal boundary condition.

2.3 초기조건 및 소재물성

예열선삭 전 초기소재의 온도는 상온 20℃을 가정하여 해석에 적용하였다.

Fig. 5는 GC 200의 열적물성을 나타낸 것으로 SYSWELD 프로그램의 재료물성 데이터를 활용하였다. 예열 및 예열선삭 시 재료의 온도변화에 따라 열 전도율, 비열 등은 달라짐으로 온도에 따른 물성 값이 고려되어야 한다. 밀도 값은 7.22×10^{-6} kg/mm^{3}의 상수로 적용되었다.



(a) conductivity (b) specific heat

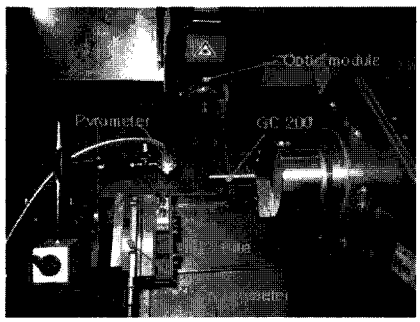
Fig. 5 Material properties for GC 200.

2.4 실험 장치 및 조건

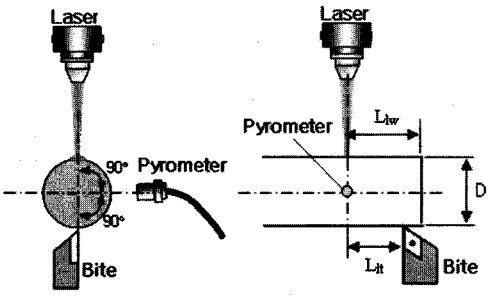
Fig. 6은 2kW급 고출력 다이오드 레이저가 접목된 CNC 기반 선반을 나타낸 것으로 광케이블을 통해 전송된 레이저 빔은 Fig. 7(a)의 광학모듈로 전송된다.

Fig. 6 HPDL integrated machining center.

Fig. 7은 실험장치 구성을 나타낸 것으로 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 표면온도와 절삭력 측정을 위한 파이로미터, 공구동력계 등으로 구성된다. Fig. 7(b)는 실험 장치들의 배치를 도식적으로 나타낸 것으로 레이저 빔과 바이트 사이각은 180°, 레이저 빔과 파이로미터의 사이각은 90°, 레이저 빔과 바이트 사이거리(L_{lt})는 2.5mm, 레이저 빔 조사 직경은 7mm이고, 선삭 전 끝단 예열 시 빔 조사중심과 소재끝단 사이거리(L_{lw})는 3.5mm이다. 파이로미터는 297℃이상의 온도를 측정할 수 있으며 주철용 바이트를 사용하였다.



(a) experimental setting



(b) Schematic of positions

Fig. 7 Experimental equipments for LAM.

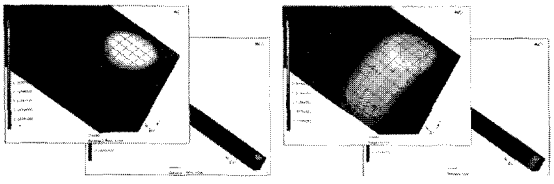
절삭 초기의 예열선삭 효과를 위해서는 끝단예열 공정이 요구된다. 그 적정조건 설정을 위해서는 소재 회전속도에 적합한 레이저 빔 출력, 이송속도 등이 결정되어야 하고 레이저빔 조사에 따른 소재가열 특성파악을 위한 기초연구가 필요하다. 이를 위해서 소재회전 속도를 620rpm으로 고정하고 빔 출력에 따른 끝단예열 표면온도 측정실험과 빔 이송 시 표면온도 측정실험을 하였다. 기초실험에서 빔 출력 범위는 500-1000W이고 빔 이송속도는 0.08mm/rev이다. 예열공정에 대한 기초실험 조건을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Preheating conditions of analysis and experiment

Specification	Values
Initial temp. of specimen (℃)	20
Dia. of beam (mm)	∅ 7
Beam power (W)	500 - 1000
Dia. of specimen (mm)	∅ 20
Feed of beam and bite (mm/rev)	0.08
Laser-edge interval Dist. L_{lw} (mm)	3.5
Laser-tool lead L_{lt} (mm)	2.5
Rotational speed (rev/min)	620, 1260
Measurement range of pyrometer (℃)	297 -

3. 해석 및 실험 결과

Fig. 8은 620rpm, 500W, 0mm/rev, 빔과 환봉끝단 사이거리 3.5mm 조건의 끝단예열에 관한 열해석초기 6스텝의 해석결과를 나타낸 것으로 열원은 스텝 당 10°씩 이동한다. Fig. 8(a)는 외부 열유속 결과로서 빔 조사에 의한 입열 에너지밀도분포를 의미하며 Fig. 8(b)는 열원의 입열에 따른 온도분포 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 빔 조사직경이 7mm로 크기 때문에 스텝 당 10°의 열원이동은 그 연속성 유지에 적합한 조건으로 생각된다.



(a) external heat flux (b) temperature distribution

Fig. 8 Thermal analysis results of pre-heating.

Fig. 9는 빔 이송 없이 끝단으로부터 3.5mm에 빔 중심을 위치시키고 소재회전속도 620rpm에서 빔 출력변화에 대한 시간에 따른 표면온도변화를 동일조건 실험과 비교하여 나타낸 것이다. 500W의 빔출력으로 50sec 동안 끝단예열 한 경우를 기준으로 열원 최대 에너지밀도 값 q_{max} 값을 변화시키며 가열부 표면온도가 704℃와 일치되는 조건을 검토했고 그 값을 1300W/cm^{2}로 결정할 수 있었다. 750W, 1000W에 대한 열원의 최대 에너지밀도 값은 비례식을 적용하여 각각 1950W/cm^2, 2600W/cm^{2}로 계산되며 이를 열 해석에 적용하였다. 빔 출력에 따른 끝단예열 시 표면온도 변화에 대한 예측결과는 동일조건 해석과 잘 일치함을 볼 수 있다. 약 700℃ 도달시간은 500W인 경우 약 50sec, 750W인 경우 약 30sec, 1000W인 경우 약 20sec임을 예측할 수 있었고 끝단 예열시간과 소재 내 열축척을 감안 했을 때 끝단예열 공정의 빔 출력은 1kW가 적당할 것으로 생각된다.

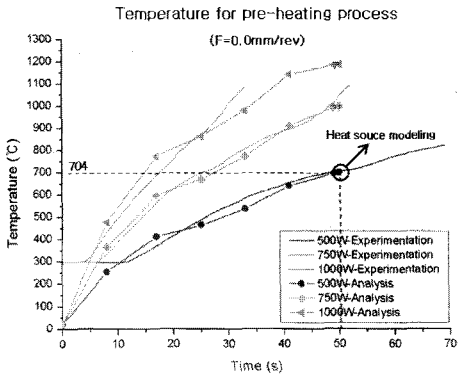


Fig. 9 Surface temperature of pre-heating with feed rate 0.0mm/rev.

Fig. 10은 끝단 예열없이 0.08mm/rev, 620rpm 조건으로 빔 이송한 경우 빔 출력별 시간에 따른 비접촉 고온계 위치의 온도변화 결과를 나타낸 것으로 실험과 해석결과의 온도변화 결과가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 300℃ 이하의 실험결과가 없는 것은 사용 비접촉 고온계의 온도 측정범위가 297℃ 이상이기 때문이며, 20sec 이상의 해석결과는 Fig. 1의 해석모델에서 예열선삭 구간 27mm를 벗어나게 되므로 나타내지 못했다. Fig. 10에서 750W 이하의 빔 출력인 경우 빔 이송에 따른 수렴온도는 600℃ 이하이고 1kW인 경우 약 750℃에서 가열표면온도는 수렴할 것으로 생각된다. 따라서 예열선삭의 빔출력은 1kW 정도가 적당할 것으로 판단된다.

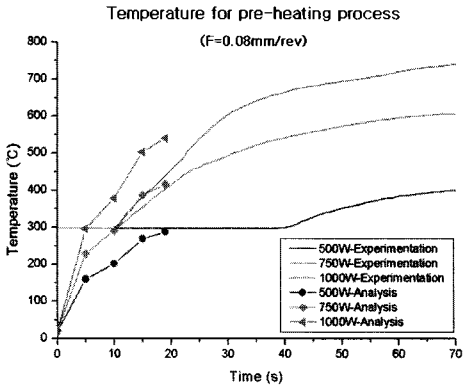


Fig. 10 Surface temperature of pre-heating with feed rate 0.08 mm/rev.

Fig. 11은 1kW, 620rpm, L_{lw} = 3.5mm 의 조건으로 20sec간 끝단예열 한 후 빔과 절삭공구의 이송속도를 0.08mm/rev, 빔과 절삭공구 사이거리 L_{lt}를 2.5mm로 하여 예열 선삭한 경우의 환봉 종단면의 온도분포를 나타낸 것이다. 온도분포에서 최대온도 범위의 지점은 절삭공구의 위치와 일치함을 볼 수 있다. 따라서 레이저 빔출력 효율을 최대한 높여 예열 선삭할 수 있는 빔과 절삭공구 사이거리(L_{lt})는 현재 실험조건인 2.5mm임을 예측, 제시할 수 있었다.

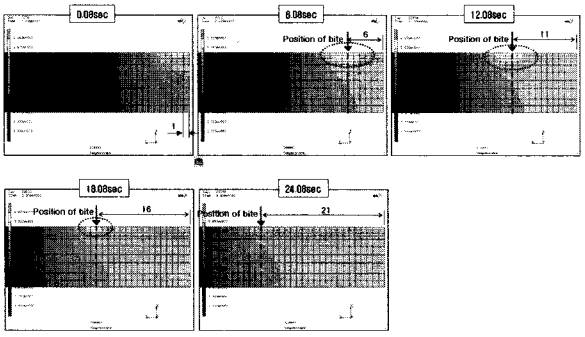


Fig. 11 Temperature distribution of longitudinal section for laser-assisted turning (1kW, 620rpm, 0.08 mm/rev, after preheating 20sec).

Fig. 12는 Fig. 11의 해석결과 중 12.08sec 시점, 즉 예열선삭 10mm 진행시점에서 절삭공구 전후 횡단면의 온도분포를 나타낸 것이다. 약 1016K이상의 온도범위를 분석한 것으로 그 최대 깊이지점과 빔의 사이각은 180°임을 볼 수 있다. 따라서 주철 예열선삭 기초실험에서 설정된 빔과 절삭공구 사이거리와 사이각 값이 적합함을 해석적으로 검토할 수 있었다.

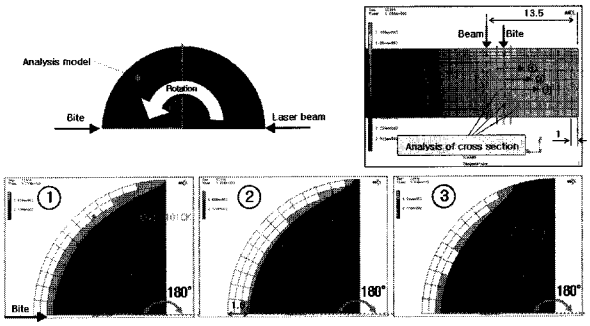
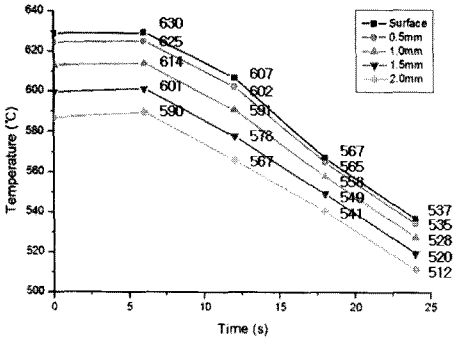


Fig. 12 Temperature distribution of cross section for laser-assisted turning(1kW, 620rev, 0.08mm/rev, after preheating 20sec).

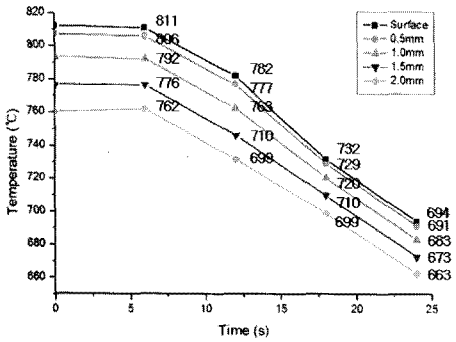
Fig. 13은 620rpm, L_{lw} = 3.5mm의 조건으로 20sec간 끝단예열 한 후 빔과 절삭공구의 이송속도를 0.08mm/rev, 빔과 절삭공구 사이거리 L_{lt}를 2.5mm로 하여 예열선삭한 경우의 시간에 따른 절삭부의 깊이방향 온도변화를 나타낸 것으로 빔 출력 750W, 1kW에 대한 해석결과이다. 총 예열선삭 시간은 24sec로 절삭공구의 이동거리는 약 19.8mm이다. 빔출력 750W, 1kW에 대해 선삭 후 6sec, 절삭공구 이동거리로는 약 5mm의 선삭동안 깊이 2mm까지의 온도변화는 일정하고, 그 이후 선삭 중 절삭부 온도는 선형적으로 감소함을 볼 수 있다. Fig. 13(a)의 빔출력 750W인 경우 절삭공구 이동거리 19.8mm의 예열선삭동안 깊이 2mm까지의 온도변화는 512-630℃일 것으로 예측되고 Fig. 13(b)의 빔출력 1KW인 경우 온도변화는 663-811℃이다. 또한 선삭이 진행되는 동안 절삭부 표면에서 깊이 2mm까지의 온도 폭은 약 20-30℃로 매우 작음을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 소재회전속도를 1260rpm으로 하여 예열선삭한 경우에 대한 절삭부 온도변화를 예측, 분석한 것으로서 총 예열선삭 시간은 12sec로 절삭공구의 이동거리는 20.16mm이다. 선삭 중 절삭부 온도는 선형적으로 감소함을 볼 수 있다. Fig. 14(a)의 빔출력 750W인 경우 절삭공구 이동거리 20.16mm의 예열선삭동안 깊이 2mm까지의 온도변화는 366-560℃이고 Fig. 14(b)의 빔출력 1kW인 경우 온도변화는 479-724℃로 예측되었다. 소재회전속도 620rpm인 Fig. 11과 비교했을 때 온도변화 폭은 전체적으로 감소됨을 확인 할 수 있다. 절입깊이 1mm 지점의 온도변화는 750W인 경우 382-602℃, 1kW인 경우 498-779℃로 예측되었다. 선삭이 진행되는 동안 절삭부 표

면에서 깊이 2mm까지의 온도 폭은 약 30℃로 620rpm의 경우와 비슷한 결과이다. 예열선삭 중 절삭부 온도변화를 분석하여 예열선삭 시 절입깊이에 따른 온도변화를 예측할 수 있었고 빔의 출력, 이송속도, 소재회전속도 등의 가공조건별 절삭부의 온도변화에 대한 데이터 베이스를 구축하였다. 이는 현장에서 주철 예열선삭의 다양한 가공조건에 대한 적정 절입깊이 결정에 중요한 판단자료로 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

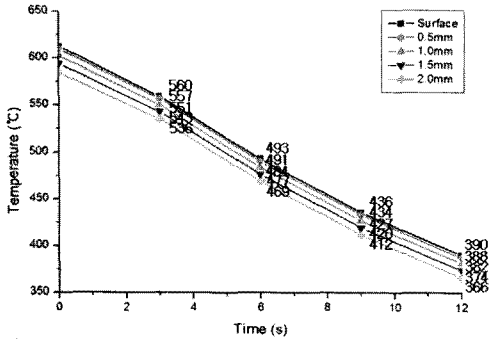


(a) 750W

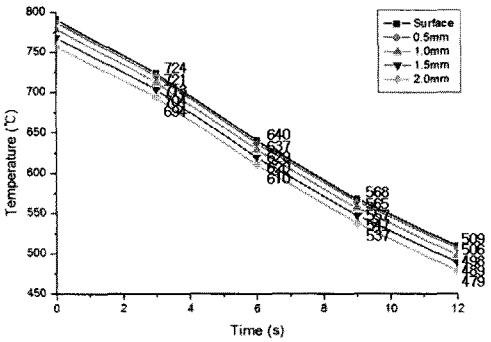


(b) 1000W

Fig. 13 Temperature of cutting zone for laser assisted turning(620rpm, 0.08mm/rev, after preheating 20sec).



(a) 750W



(b) 1000W

Fig. 14 Temperature of cutting zone for laser assisted turning (1260rpm, 0.08mm/rev, after preheating 20sec).

4. 결 론

GC 200 주철환봉의 레이저 복합가공에 대해 MARC를 이용한 예열선삭 중 소재내부 온도변화 예측과 기초실험을 통한 적정 예열조건 설정에 관해 연구했으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 예열선삭에 있어서 레이저 빔과 절삭공구의 적정위치 설정이 필요하고 그 위치는 실험내용 및 조건에 따라 달라질 수 있으며 열해석을 통해 그 적정 값을 사이각은 약 180°, 사이거리는 약 2.5mm로 예측 제시할 수 있다. 사용 레이저 빔 출력에 대한 가열효율의 극대화를 위해서는 예열선삭 동안 그 설정 값의 유지가 필요할 것이다.
2) 끝단 예열공정 및 예열선삭 조건 설정을 위해 레이저 빔의 출력과 이송속도에 대한 소재가열 온도와 특성을 분석한 결과, 끝단예열공정 조건은 1kW, 620rpm, 20sec가 적합할 것으로 판단된다.

참고문헌

1) Özler, L., İnan, A. and Özel, C., "Theoretical and Experimental Determination of Tool Life in Hot Machining of Austenitic Manganese Steel", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, pp. 163-172, 2001.
2) López de Lacalle, L. N., Sánchez, J. A., Lamikiz,

A. and Celaya, A., "Plasma Assisted Milling of Heat-Resistant Superalloys", Transaction of the ASME, Vol. 126, pp. 274-285, 2004.

3) Jeon, Y. and Pfefferkorn, F., "Effect of Laser Preheating the Workpiece on Micro end Milling of Metals", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 130, Issue 1, pp. 011004-01-09, 2008.
4) Skvarenina, S. and Shin, Y. C., "Laser-assisted Machining of Compacted Graphite Iron," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, pp. 7-17, 2006.
5) Anderson, M. C. and Shin, Y. C., "Laser-assisted Machining of an Austenitic Stainless Steel: P550," International Journal of Engineering Manufacture, Vol. 220, No. 12, pp. 2055-2067, 2006.
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 Manufacture, Vol. 46, pp. 2009-2016, 2006.
7) Shin, D. S., Lee, J. H., Lim, S. H., Kim J. D. and Lee, S. J., "Cutting Charateristics on Rake Angle in Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 26, No. 4, pp. 47-54, 2009.
8) Lim, S. H., Lee, J. H., Shin, D. S., Kim, J. D. and Kim, J. H, "A Study on Laser-Assisted Machining Process of Silicon Nitride," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 48-56, 2009.
9) Kim, K. W., Cho, H. Y., Lee, J. H., Suh, J., Shin, D. S. and Lim, S. H., "The Study for Laser-Assisted Machining of Difficult-to-Cut Steel," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Autumn Meeting, pp. 711-712, 2008.