https://doi.org/10.21289/KSIC.2022.25.6.1127

LAM 가공조건에 따른 열-구조 연성해석

A Study on the Thermo-Mechanical Coupling Analysis to Working Condition of LAM

박정호[1*], 박성호[2], 김귀남[3]

Jeong-Ho Park[1*], Sung-Ho Park[2], Gwi-Nam Kim[3]

〈Abstract〉

Recently, the use of aircraft structures using Ti alloy (Ti-6Al-4V), a lightweight high-strength alloy material, is rapidly increasing due to the weight reduction of aircraft. However, high-strength materials such as Ti alloys require high energy for cutting and are classified as difficult-to-cut materials. Also, research on Laser Assisted Machining (hereinafter referred to as LAM), a cutting processing technology that utilizes improved machinability, is being actively researched. Therefore, in this paper, in order to confirm the proper temperature distribution using a laser, the finite element method is used to determine the temperature distribution according to the calorific value condition to derive the appropriate condition, and the thermal load generated at this time is used as a structural analysis. It is intended to be used as basic data for LAM processing conditions by measuring the amount of residual stress and thermal deformation caused by heat.

Keywords : LAM(Laser Assist Maching, Thermo-Mechanical Coupling, Moving Heat Flux Method

1* 정회원, 교신저자, 창원문성대학교, 조교수
E-mail: pjh74@cmu.ac.kr
2 정회원, 창원문성대학교, 조교수
E-mail: psungho76@naver.com
3 정회원, 순천제일대학, 조교수
E-mail: gnkim@suncheon.ac.kr

1* School of Smart Mechanical automobile Engineering, Changwon Moonsung University
2 Aviation Maintenance & Drone Engineering, Changwon Moonsung University
3 Department of Mechanical and Automotive Engineering, Suncheon Jeil College

1. 서 론

최근 항공기 경량화에 따른 경량 고강도 합금소재인 Ti합금(Ti-6Al-4V)을 적용한 항공기용 구조물의 사용량이 급격히 증가된다. 하지만 Ti합금과 같은 고강도 소재는 절삭가공에 높은 에너지를 필요로 하며 가공이 어려운 난삭재로 분류하고 있다. 금속은 온도에 따라 기계적 강도에 영향을 받게 되는데 고온환경에서 격자구조가 바뀌게 되며, 기계적 강도가 저하되어진다. 따라서 고온환경에서 절삭가공을 하게 되면 공구에 부하를 줄여주며, 가공성을 향상시키기 된다. 이러한 특성을 활용한 절삭가공 기술인 Laser Assisted Machining(이하 LAM)에 대한연구가 활발히 이루어지고 있다. [1-5]

Fig. 1은 LAM가공에 대한 모식도를 나타내고 있다. 절삭공구가 지나가는 경로에 앞서 레이저를 조사하여 국부적으로 승온시켜 주게 되는 원리이다. 하지만 이 기술은 핵심은 레이저에 의한 열분포를 파악하여 절삭속도를 조절하는 것에 있다. [6-15]

따라서 본 논문에서는 레이저를 이용하여 적절한 온도분포를 확인하기 위하여 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 발열량 조건에 따른 온도분포를 파악하여 적절한 조건을 도출하고자 하며, 이때 발생하는 열 하중을 구조해석으로 전달하여 열에 의한 잔류응력 및 열 변형량을 측정하여 LAM가공조건의 기초자료로써 활용하고자 한다.

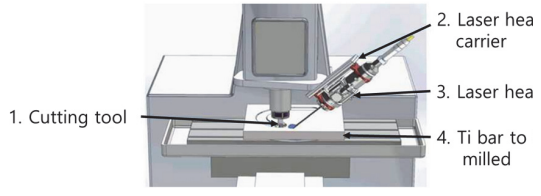

Fig. 1 Schematic diagram of laser assisted machining

2. 열-구조 연성해석 개요

LAM해석은 절삭가공을 위한 이송과 함께 열원이 이송을 하게 되며 그에 이송조건에 따라서 열분포가 달라지기 때문에 열 해석시에는 열원이 이동하도록 Fig. 2와 같이 Moving heat flux method를 적용하여 해석을 진행하였으며, 그에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$q = C_2 e^{-\frac{\left[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2\right]}{C_1^2}} \quad (1)$$

q = heat flux on the desired surface
C1 = Radius of the beam
C2 = Source Power Intensity
(X0, Y0, Z0) = Instantaneous position of the center of the heat flux which is on the path at the distance of 'v × t' from the 'start point'
v = velocity of the moving heat source
t = Time

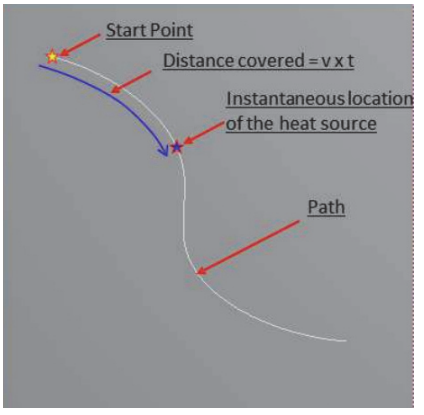

Fig. 2 Moving heat flux sourcer

2.1 해석모델

해석에 사용된 시편모델은 25×30×100mm 크기의 직육면체형태로 3D모델링을 실시하였다.

Fig. 3에 그 모델을 나타내었으며, 붉게 표시된 면에 Symmetry영역으로 지정하였다. 열원은 Symmetry 면 상부 라인에 적용하여 시편 중앙으로 열원이 지나가도록 조건을 부여하였다.

2.2 해석조건

레이저 열원 이동에 따른 열 분포를 확인하고자 시간변화에 따른 열 해석(Transient Thermal Analysis)을 진행하였으며, 그 해석 결과를 구조해석의 열 하중으로 입력하여 구조해석을 진행하였다.

Fig. 4는 열해석 경계조건을 나타내고 있다. 직육면체 중 symmetry 영역을 제외한 나머지 5개의 면을 convection조건을 부여하였다. 대류 값은 5 W/mm^2℃로 자연대류 조건으로 적용 하였다. 빨간색 라인으로 표시된 부분은 열원이 이동하는 경로로 지정된 라인을 나타내며, 왼쪽 Starting point부터 시작하여 반대쪽 지점까지 열원이 이동하도록 해석을 실시하였다. Fig. 5는 구조해석 경계조건을 나타내고 있다. 시편의 바닥면을 Displacement 조건으로 X, Y방향으로는 변위를 허용하되 Z방향으로 변위를 제어하였다. 모든 해석의 유한요소 모델은 mesh size를 1mm로 하여 육면체 형태로 하였으며, 그 형상은 Fig. 6에 나타내었다.

해석은 총 Case1 ~ Case12까지 실시하였으며, 승온속도 및 온도분포를 결정하는 요소로 Laser power, Laser diameter, feed rate로 변수를 설

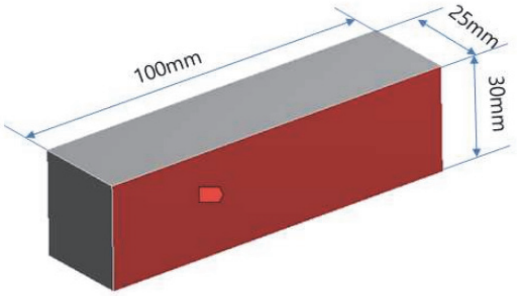

Fig. 3 Image of 3D modeling for thermal analysis

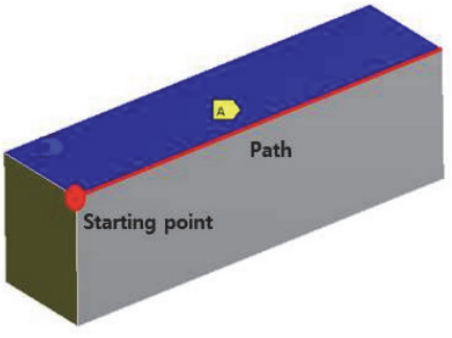

Fig. 4 Boundary condition of transient thermal analysis

Fig. 5 Boundary condition of structure analysis

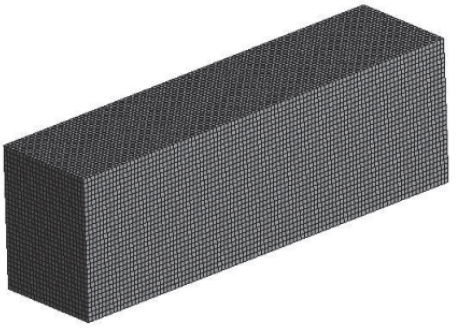

Fig. 6 Image of meshing modeling

정하였다. Laser power는 참고논문[16]의 결과값을 토대로 240W, 320W, 400W로 설정하였다. Laser diameter는 laser스펙을 고려하여 직경이 5mm, 10mm인 원형 열원을 적용하였다. feed rate는 예비실험 설정값을 고려하여 100mm/min, 45mm/min의 값을 각각 1.6mm/s, 0.75mm/s로 환산하여 적용하였다. 해석의 직접적으로 발열량을 결정하는 Heat flux는 아래의 계산식에 의하여 결정하였다.

$$heat\ flux = C \times \frac{W}{A} \quad (2)$$

Table 1. Conditions of thermal analysis each case

No	Power (W)	Laser diameter (mm)	Feed rate	Heat flux (W/mm^2)
Case1	240	5	1.6mm/s (100mm/min)	5.623
Case2	320	5	1.6mm/s (100mm/min)	7.947
Case3	400	5	1.6mm/s (100mm/min)	9.371
Case4	240	5	0.75mm/s (45mm/min)	5.623
Case5	320	5	0.75mm/s (45mm/min)	7.497
Case6	400	5	0.75mm/s (45mm/min)	9.371
Case7	240	10	1.6mm/s (100mm/min)	1.406
Case8	320	10	1.6mm/s (100mm/min)	1.874
Case9	400	10	1.6mm/s (100mm/min)	2.343
Case10	240	10	0.75mm/s (45mm/min)	1.406
Case11	320	10	0.75mm/s (45mm/min)	1.874
Case12	400	10	0.75mm/s (45mm/min)	2.343

C : Coefficient of absorption
A : Area
W : Power

흡수계수 값은 참고논문[17]을 참고하여 0.46으로 설정하였다. 위 조건을 고려하여 12개의 Case의 조건을 Table 1에 나타내었다.

2.3 Ti-6Al-4V 물성치

해석에 적용한 Ti합금의 물성치를 Table 2에 나타내었다. 열전도율 및 비열은 온도변화에 따라서 값이 변하기 때문에 Table 3에 나타낸 수식을 적용하였다.

Table 2. Material property of Ti-6Al-4V

Property	Value
Density	4429 kg/m^3
Young's modulus	113.8 Gpa
poisson's ratio	0.3399
Yield strength	839.9 MPa
Tensile strength	930 MPa

Table 3. Equation of thermal conductivity and specific heat

Thermal property	Value
Thermal conductivity (W/mK)	$1.00\times10^{-5}\times T^2-0.0012\times T+6.6519$
Specific heat (J/kgK)	$0.21\times T+483.37$

3. 열-구조 연성해석 결과

LAM 가공조건에 따른 열-구조 연성 해석의 결과를 다음과 같이 정리하였다.

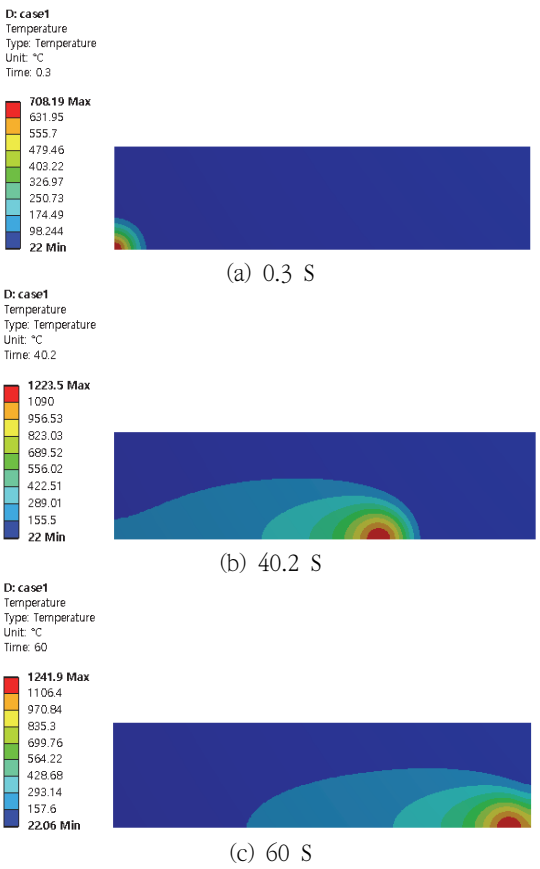

Fig. 7 Results of transient thermal analysis on case1

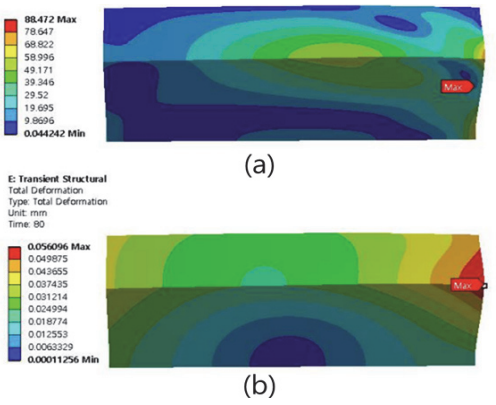

Fig. 8 Results of transient structure analysis on case1
(a) Equivalent stress (b) Total deformation

Table 4. Results of temperature distribution reference and thermal analysis

Laser power(W)	Heat effect depth(mm)	Reference temperature(℃)	Analysis result(℃)
240	0	1300	1223.3
	2.0	600	824.6
	3.5	350	599.2
320	0	1500	1503.9
	2.0	770	1014.8
	3.5	500	759.6

Table 5. Results of thermal-structure analysis

No	Max temp(℃)	X-axis dist (mm)	Y-axis dist (mm)	Z-axis dist (mm)	Equation stress (MPa)	Total deform (mm)
Case1	1223.3	13.4	7.3	4.3	88.47	0.056
Case2	1505.2	17.6	8.2	5.8	114.59	0.073
Case3	1792.8	22.3	9.1	6.3	139.28	0.084
Case4	1356.4	14.5	9.0	6.6	135.97	0.315
Case5	1678.7	19.2	10.5	8.2	169.98	0.607
Case6	2004.1	24.0	11.5	9.5	199.41	0.458
Case7	672.1	9.8	7.0	2.0	89.21	0.047
Case8	823.5	14.9	9.6	2.5	119.69	0.066
Case9	953.8	19.6	11.0	4.4	142.65	0.083
Case10	787.9	12.8	10.0	4.1	136.10	0.197
Case11	951.6	17.3	12.5	6.1	172.14	0.225
Case12	1094.6	22.0	14.0	8.0	203.02	0.447

(1) 12개의 조건의 해석 결과는 각기 분포 온도와 분포범위에 차이가 발생할 뿐 형태가 유사하여 그 대표 결과로서 Case 1에 대한 결과 그림을 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 7의 해석 결과에서 시작 위치부터 끝 부분까지 열원의 이동이 적절하게 적용된 것을 확인할 수 있다. Table 5는 Case1 ~ Case12까지의 모든 해석 결과를 표로 나타내었다. Ti합금은 녹는점이 1700℃ 이기 때문에 그 이상의 열 분포를 보이는 조건은 부적합 할 것이며, Case3과 Case6에서 최대 온도 값이 각각 1792.8℃, 2004.1℃로 녹는점 이상의 온도를 보여 적절한 조건이 아닌 것으로 사료된다.

(2) 해석 결과의 신뢰성 확인을 위하여 참고논문[16]의 실험 결과와 조건이 같은 Case1, Case2 해석 결과를 비교하여 Table 4에 나타내었다.

Laser power를 240W, 320W로 하였으며, 깊이 0mm, 2mm, 3.5mm 값을 비교하였다. 표면온도는 비교데이터와 해석 결과가 유사한 온도 범위를 보이고 있으나, 깊이가 깊어지게 되면 차이가 나는 것을 확인하였다. 이 결과는 참고 자료의 경우 깊이방향 측정을 위해 노출되어 있는 측면의 온도를 측정하였지만, 해석의 경우 Symmetry조건으로 설정하여 시편 중앙부를 가열한 것으로 가정하였기 때문에 대류조건에 따른 차이인 것으로 사료된다. 따라서 현재 해석조건은 적절하게 설정되었음을 확인하였다.

(3) 본 해석을 검토한 결과 원형의 레이저 열원을 통하여 가열하였을 경우 Fig. 9와 같이 라운드

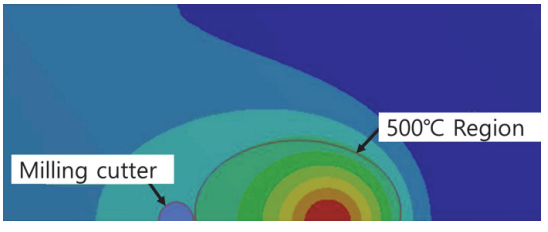

Fig. 9 Image of temperature region and milling cutter

형의 열 분포를 보인다. 이러한 분포는 원형의 밀링커터가 절삭하게 되면 열 분포가 균일하지 않아 가공 시 저항차이의 발생이 우려되며, 사각형 열원 등 이에 따른 추가연구가 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

LAM 가공조건에 따른 열-구조 연성 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) X축 변위는 열원과 밀링커터의 간격을 의미하며, Y축은 최대공구의 반경, Z축 변위는 가공 가능한 깊이를 나타내고 있기 때문에 본 연구의 토대가 되는 기술개발의 1차년도 정량적 목표인 반경절입 16mm, 절삭깊이 1mm의 목표치를 만족하고 있는 결과를 보이고 있다.

(2) Case1의 조건에 대한 해석 결과가 최대온도, 축방향 거리, 열응력 등의 평가요소에 대해 가장 낮은 경향을 보여 Case1에 해당하는 조건이 가장 양호한 가공성을 보일 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원(KIAT) 연구비지원에 의한 연구임(항공부품용 경량고강도 합금소재 형상가공설계 및 공정기술 개발, 과제번호: 제2021-228호-005).

참고문헌

[1] Y. Altintas, E. Budak, “Analytical Prediction

of Stability Lobes in Milling, Manufacturing Automation Laboratory", Dept. of Mechanical Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada Received on January 9, (1995).

[2] Wu. Baohai, Yan. Xue, Luo. Ming, Gao. Ge, "Cutting force prediction for circular end milling process", Chinese Journal of Aeronautics, Vol.26(4), pp. 1057-1063, (2012).

[3] Y. Altintas, P. Lee, "A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills", Department of mechanical Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canada Received on January 9, (1996).

[4] O. Gonzalo, J. Breistain, H. Jauregi, C. Sanz, "A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.50, 765-774, (2010).

[5] H. Ding, Y. C. Shin, "Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.50, pp. 106-114. (2010).

[6] M. S. Sim, C. M. Lee, "A study on laser assisted machining according to tool path inclination angle of inclined workpiece and workpiece with rotated angle with respect to 2-axes", Master thesis, Changwon National University, (2014).

[7] N. H. Cha, C. M. Lee, "A study on the effect of laser preheating for Silicon nitride in laser assisted turn-mill. Master thesis", Changwon National University, 2013.

[8] K. S. Kim, C. M. Lee, "A study on the effect of laser preheating in laser assisted machining of planar plates", Master thesis, Changwon National University, (2012).

[9] J. H. Kim, C. M. Lee, "A study on effect of laser preheating in laser assisted turn-mill for machining square bar and spline bar", Master thesis, Changwon National University, (2011).

[10] J. H. Kim, J. Y. Choi, C. M. Lee, "A Study on the Effect of Laser Preheating on Laser Assisted Turn-Mill for Machining Square and Spline Members", Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol.15(2), pp. 275-282, (2014).

[11] K. S. Kim, T. W. Kim, C. M. Lee, "Analysis of a Laser Assisted Milling Process with Inclination Angles", Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol.14(8), pp. 1495-1499, (2013).

[12] J. Yang, S. Sun, M. Brandt, W. Yan, "Experimental investigation and 3D finite element prediction of the heat affected zone during laser assisted machining of Ti6Al4V alloy", Journal of Materials Processing Technology, Vol.210, pp. 2215-2222, (2010).

[13] S. Sun, M. Brandt, J. E. Barnes, M. S. Dargusch, "Experimental investigation of cutting forces and tool wear during laser-assisted milling of Ti-6Al-4V alloy", Journal of Engineering Manufacture, Vol.225(9), pp.1512-1527, (2011).

[14] D. H. Kim, C. M. Lee, "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).

[15] M. J. Bermingham, P. Schaffarzyk, S. Palanisamy, M. S. Dargusch, "Laser-assisted milling strategies with different cutting tool paths", International Journal of Advanced Manufactruing Technology, Vol.74 (9-12), pp. 1487-1494, (2014).

[16] M. Ahn, J. Park, Y. Joo, S. Park, "Correlation between base metal temperature and cutting speed during high-speed Milling processing of laser heating for Ti-6Al-4V aircraft components", Journal of KSAS 2021 fall Conference, pp. 145-146, (2021).

[17] R. Wiedermann, M. Zaeh, "Laser-assisted milling—Process modeling and experimental validation", CIRF Journal of Manufacturing Science and Technology 2015 Vol.8, pp. 70-77, (2015).

(접수: 2022.10.31. 수정: 2022.11.29. 게재확정: 2022.12.05.)