

항온 Laser MCT(LAM) 복합 가공의 최적 가공 조건 해석

A Study on the Analysis of Optimal Working Condition for Constant Temperature Laser MCT(LAM) Combined Machining

박정호^{1*}, 김귀남²

Jeong-Ho Park^{1*}, Gwi-Nam Kim²

〈Abstract〉

Ti-alloy, a high-strength alloy material among the materials used in aircraft that are trending toward lighter weight, is classified as a difficult-to-cut material that requires a lot of energy for cutting. Cutting in a high-temperature environment is considered one means of making this possible, and various studies have been conducted on it. In particular, research on LAM (Laser Assisted Machining (LAM)), which utilizes laser heating of the cutting area, is being actively conducted. Before processing of the milling cutter begins, the temperature is raised locally by the laser irradiated through the laser head carrier, and the resistance during milling is reduced. Therefore, in this paper, in order to derive such conditions, we performed heat transfer analysis according to transfer conditions and compared it with actually applied test data to use it to establish appropriate processing conditions.

Keywords : *LAM(Laser Assist Maching), Constant Themperature Conbined Machining*

1* 정회원, 주저자, 창원문성대학교, 조교수

E-mail: pih74@cmu.ac.kr

2 정회원, 순천제일대학, 조교수

E-mail: gnkim@suncheon.ac.kr

1* School of Smart Mechanical automobile Engineering,

Changwon Moonsung University

2 Department of Mechanical and Automotive Engineering,

Suncheon Jeil College

1. 서론

경량화 추세인 항공기에 사용되는 소재 중 고강도 합금 소재인 Ti합금은 절삭가공에 많은 에너지를 수반하는 난삭재로 분류된다. 또한 금속은 온도에 따라 다양한 기계적 영향을 받게 되는데 이를 고려한 절삭가공 조건을 수립하기 위해서는 모재에서 발생하는 온도의 영향과 가공성을 향상시키기 위한 외부 조건 등이 고려되어야 한다. 고온 환경에서의 절삭가공은 이를 가능하게 하는 한 가지 수단으로 여겨지며 이에 대한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. [1] 특히 레이저를 이용한 절삭부위의 가열을 활용한 LAM(Laser Assisted Machining(이하 LAM))에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. [2-5]

Fig. 1은 LAM가공에 대한 개략도를 나타내며 공구가 전진하는 경로 앞에서 레이저를 활용한 국부적 가열로 모재의 온도를 상승시켜 절삭을 도와주게 되는 원리이다. 이 기술의 핵심은 레이저에 의한 모재의 열 분포를 예측하여 가공 조건을 수립하는 것이다. [6-8]

밀링커터의 가공이 시작 되기전 Laser head carrier를 통하여 조사된 Laser에 의하여 국부적으로 온도가 상승하게 되며, 밀링가공 시 저항을 감소시키게 된다. 밀링커터의 이송 속도와 Laser head carrier의 이송 속도는 같은 속도로 움직이게 설계되었다. 따라서 이송 속도가 빠르게 되면 밀링 작업시간은 감소하나, 레이저의 온도가 전달되는 시간이 감소하여 목표 온도의 영역이 감소



Fig. 1 Schematic diagram of laser assisted machining

하게 된다. 만약 반대로 이송 속도가 느리게 되면 밀링 작업 속도는 증가하게 되지만, 레이저의 온도가 재료 내부까지 전달되는 시간이 생기므로 절입 깊이나 사용 공구의 반경을 증가시킬 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 논문에서는 이와 같은 조건을 도출하기 위하여 이송 조건에 따른 열전달 해석을 수행하고 이를 실제 적용한 시험데이터와 비교하여 적절한 가공 조건 수립에 활용하고자 하였다.

2. 가공 조건에 따른 열 해석

2.1 이론적 배경

다차원 비정상상태에서 열전도도 방정식은 다음과 같이 3차원 정상상태를 나타내는 지배방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

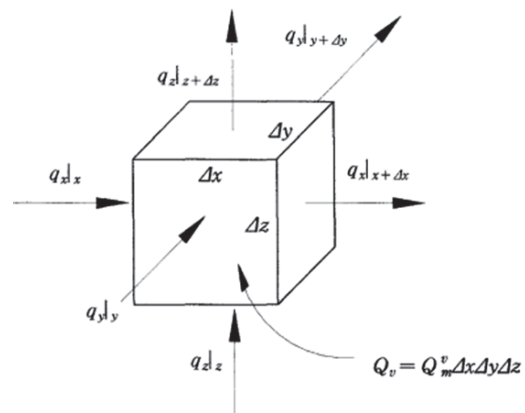


Fig. 2 Three-dimensional cartesian elemental volume in a solid for derivation of the heat conduction equation

여기서, k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} : x, y, z 방향의 열전도율

ρ : 밀도 (g/cm^3)

C : 비열 ($J/kg \cdot K$)

을 나타낸다.

2.2 가공 조건에 따른 해석 조건

2.2.1 열 해석(Transient Thermal analysis)조건

모델 사이즈는 가공에 적용되는 모델 사이즈로 설정하여 $100 \times 100 \times 50$ 으로 설정하였다. 하지만 단순 모델링이며 해석의 수행은 Node와 Elements의 수에 따라서 시간이 달라지기 때문에 이를 줄이기 위하여 모델은 절반의 크기로 모델링 하였다. 모델의 크기는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이

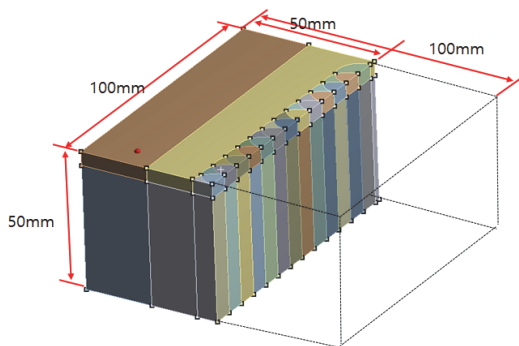


Fig. 3 3D modeling of heat transfer analysis

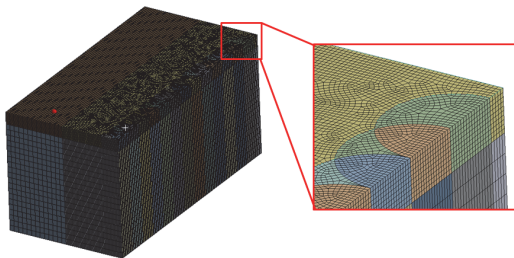


Fig. 4 Image of finite element model for heat transfer analysis

$100 \times 50 \times 50$ 으로 모델링 하였다. 해석모델에서 보이는 여러 영역으로 나누어진 이유는 레이저 열원을 입력하기 위하여 레이저 직경 크기만큼의 원형으로 분류된 부분과 열을 직접적으로 받는 영역과 열을 전달받는 영역을 구분하여 Mesh 크기를 다르게 구분 짓기 위해서이다. Mesh 작업을 실시한 유한요소 해석 모델을 Fig. 4에 나타내었다. node의 수는 398,226개, Elements는 378,540개로 모델링 하였다. 유한요소의 종류는 해석의 정확도를 높이기 위하여 육면체로 구성하였으며, sweep method를 사용하였다.

2.2.2 열 해석 경계조건

해석의 경계조건은 Fig. 5에 나타내었다. 원래 크기의 모델을 해석 시간을 고려하여 절반으로 절단한 후에 절단면을 symmetric조건을 부여하여 좌우 대칭한 결과를 얻도록 설정하였다. 표면의 공기 중에 냉각되는 것을 고려하기 위하여 자연대류 조건을 입력하기 위하여 Convection 조건을 입력하였고 $0.5 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 으로 값을 설정하였다. Fig. 6은 온도 조건에 관하여 나타내었다. 온도 입력은 레이저가 900°C 로 셋팅 되면 매우 짧은 시간의 발열량을 조절 해가며 그 온도를 유지하기 때문에 직접적으로 temperature로 입력하였다. 레이저 크기대로 모델링이 되었기 때문에 각 스텝별

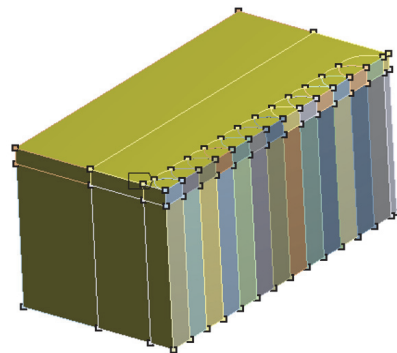


Fig. 5 Image of convection for natural state

로 온도를 부여해가며 열원이 이동하는 것을 모사하였다. 첫 번째 원에 900℃온도가 가해지고 나면 두 번째 원에 900℃가 가해지고, 열을 가했던 첫 번째 원은 자연대류 조건이 적용된다. 이 후에 원들에 순차적으로 이와 같은 방법으로 열을 가했으며, 이 방법은 용접 잔류응력 해석 시 사용되는 방법으로 적층방식으로 용접 비드를 생성해 가는 방

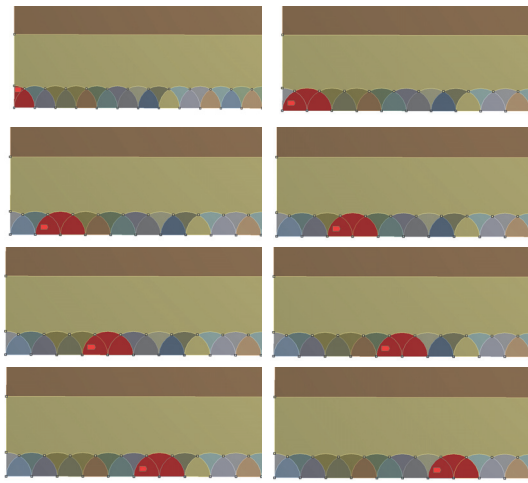


Fig. 6 Image of temperature area by step

Table 1. Table of time step following feed speed

No	sec	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Step 1	0.428	0.36	0.3	0.265	0.225	
Step 2	0.856	0.72	0.6	0.529	0.45	
Step 3	1.284	1.08	0.9	0.794	0.675	
Step 4	1.712	1.44	1.2	1.059	0.9	
Step 5	2.14	1.8	1.5	1.324	1.125	
Step 6	2.568	2.16	1.8	1.588	1.35	
Step 7	2.996	2.52	2.1	1.853	1.575	
Step 8	3.424	2.88	2.4	2.118	1.8	
Step 9	3.852	3.24	2.7	2.382	2.025	
Step 10	4.28	3.6	3	2.647	2.25	
Step 11	4.708	3.96	3.3	2.912	2.475	
Step 12	5.136	4.32	3.6	3.176	2.7	
Step 13	5.564	4.68	3.9	3.441	2.925	

식을 모사할 때 사용되는 해석법이다.

해석에서의 변수는 레이저의 이동속도, 즉 가공 속도를 변수로 설정하여 해석을 진행하였으며, 이송 속도에 따른 step별로 해석 시간을 설정하여 열원의 이동속도에 따라 열 분포를 확인하도록 설정하였다.

각 케이스의 이송 속도는 1,050 mm/min, 1250 mm/min, 1500 mm/min, 1700 mm/min, 2000 mm/min으로 총 5가지 조건으로 설정하였으며, 케이스 별로 Step당 시간을 계산하여 Table 1에 나타내었다.

2.2.3 Ti-6Al-4V 소재 물성치

해석에 적용한 소재인 Ti합금의 재료 물성치를 Table 2에 나타내었다. 열전도율 및 비열은 온도 변화에 따라서 수치가 변하기 때문에 Table 3에 나타난 수식을 활용하였다.

Table 3에 나타난 식을 이용하여 적용되는 열전

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
Isotropic thermal conductivity	Fig. 3-7
Specific heat	Fig. 3-8

Table 3. Equation of thermal conductivity and specific heat

Thermal property	Value
Thermal conductivity (W/mK)	$1.00 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.0012 \times T + 6.6519$
Specific heat (J/kgK)	$0.21 \times T + 483.37$

도율 및 비열 그래프를 아래 Fig. 7에 나타내었다.

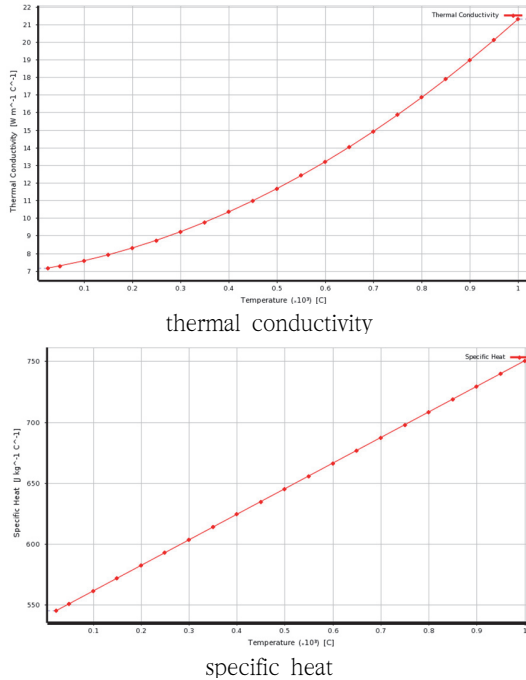


Fig. 7 Graph of thermal characteristic

2.3 열해석 결과

Ti-6Al-4V 재질은 열전달 계수가 낮아 한번 열을 받게 되면 자연대류로 인한 냉각이 빠르게 이루어지지 않는다. 열전달의 형상은 이송속도가 빨라지게 되면서 각 영역의 온도는 변화하지만 형상은 대동소이한 결과를 보여 대표적으로 case1의 형상만을 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 9는 case1의 반경 방향 해석 결과로 feed speed를 1,050 mm/min속도로 설정하였다. 각 위치는 노드간의 거리로 측정한 거리에서의 온도를 나타내며, 8.454mm, 12.684mm, 19.71mm 그리고 33.299mm 위치에서의 온도를 보여주고 있으며 Fig. 10은 같은 조건의 깊이 방향으로의 결과로 반경끝, 4.23mm, 11.256mm, 24.845mm

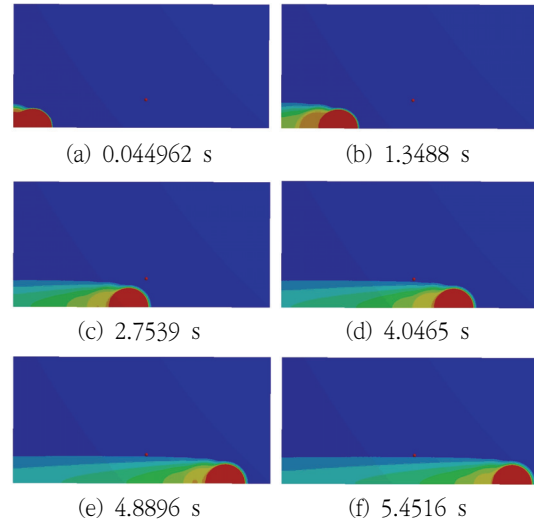


Fig. 8 Results of heat transfer analysis each case

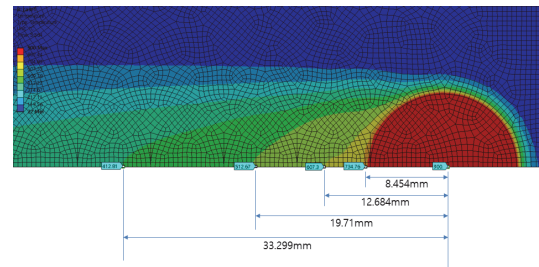


Fig. 9 Result of heat distribution on case1(radial direction)

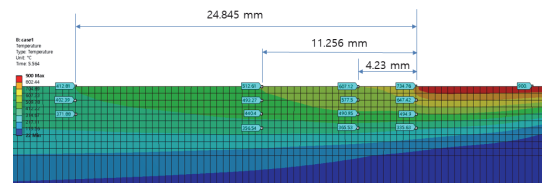


Fig. 10 Result of heat distribution on case1(depth direction)

기준에서의 1mm간격의 깊이로 온도를 나타내고 있다.

모든 분포의 온도가 큰 폭으로 변화되어지지 않으며 온도분포는 반경 중심과 가장 가까운

8.454mm 위치에서 case1의 온도가 가장 높게 나타났고, case2, case3, case4, case5 순의 온도 분포를 보인다. 하지만 열원에서 멀어질수록 반대로 case5가 가장 높게 나타났고, 그 다음으로 case4, case3, case2, case1의 경향을 보이고 있다. 이 결과로 열원이 빠르게 이동될수록 자연대류로 인한 냉각이 늦어지는 것을 확인할 수 있다. 그에 대한 자세한 온도 수치는 Table 4에 나타내고 있다.

이송 속도에 따른 변화를 깊이 방향으로 비교하였으며 비교 기준은 Position 1(8.454mm), Position 2(12.684mm), Position 3(19.71mm), Position 4(33.299mm) 위치의 깊이 방향 0mm, 1mm, 2mm,

Table 4. Temperature data each case (radial direction)

Temp(°C) Location (mm)	Case1	case2	case3	case4	case5
8.454	734.76	729.22	723.41	717.05	712.84
12.684	607.3	611.46	614.8	616.45	618.66
19.71	512.67	517.19	521.01	523.42	525.69
33.299	412.81	419.09	421.8	427.19	430.25

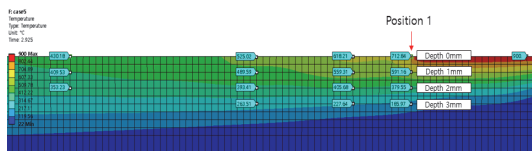


Fig. 11 Image of measure position 1 of heat transfer analysis(depth direction)

Table 5. Temperature data each case on position 1

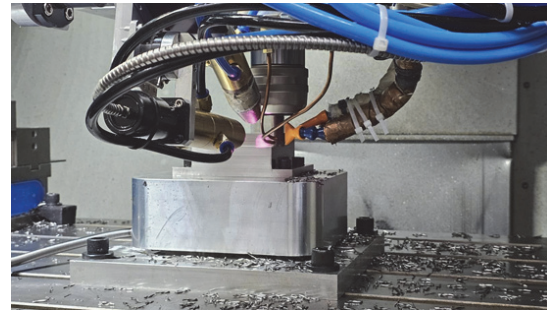
Temp(°C) Depth (mm)	Case1	case2	case3	case4	case5
0	734.76	729.22	723.41	717.05	712.84
1	647.42	633.53	435.63	607.33	591.16
2	494.9	469.54	435.63	412.14	379.55
3	335.63	294.2	253.84	224.32	185.97

3mm Node의 온도를 비교하였다.

Fig. 11은 position 1위치에서 각 case의 결과를 비교한 그래프이다. 표면에서는 이송 속도와는 관계없이 비슷한 온도를 보이지만 깊이가 깊어질수록 이송 속도가 증가함에 따라서 측정되는 온도가 낮아지는 경향을 보이고 있다. 각 포인트에서의 온도를 Table 5에 나타내었다.

2.4 MCT 활용 LAM 가공 시험

개발중인 LAM 가공 장비에 대한 가공 시험을 시행하였다. 본 시험은 한국산업기술시험원(KTL)의 주관하에 시행되었으며, 현재 시험결과와 이를 기반으로한 가공 조건의 설정은 진행중에 있으며 기술개발이 마무리되는 시점에 최적의 가공 조건과 이에 수반되는 공구 수명 등이 도출될 것이다.



(a) Laser generator



(b) Test applied machine tools

Fig. 12 Image of measure position 1 of heat transfer analysis(depth direction)

Table 6. Temperature data each case on position 1

Test Items			Test result
Cutting resistance			53.92(N)
Cutting amount			12.75 mm ³ /min
Cycle Time			24min 39sec
tool life	Tool wear amount	1	0.045 mm
		2	0.041 mm
		3	0.050 mm
		4	0.053 mm
	Visual inspection	1	no damage
		2	no damage
		3	no damage
		4	no damage

가공 장비는 두산 DNM6700 MCT 모델에 Raycus RFL-A4000D 레이저 발생장치가 장착되어 있으며 해석과 동일한 Ti-6AL-4V 자재를 적용하여 시험하였고, 절삭 저항, 절삭량, 작업시간, 공구 수명 등을 측정하였다. 해석의 결과를 고려하여 가공 조건을 설정하였으며, Fig. 12에서 시험에 사용된 레이저 발생장치와 MCT를 보여 주고 있다.

Table 6에서 시험 결과를 보여 주고 있다. 현재 단계에서는 시험 결과의 항목들이 당초 설정한 기술개발의 목표항목에 부합하고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

LAM 가공의 적절한 가공 속도를 도출하기 위하여 Feed속도에 따른 열 분포를 확인하고자 열 해석을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표면 부분의 열 분포를 확인하기 위하여 Case1의 열 분포를 기준으로 하여 각 Case 별로 열원 중심으로부터 8.454mm, 12.684mm, 19.71mm, 33.299mm의 위치의 온도를 분석하였다. Feed속도가 빨라질수록 표면의

온도는 높아지는 경향을 보이고 있다. 그 원인으로는 열원은 빠르게 이동하기 때문에 표면이 냉각되기 이전에 열원이 진행되므로 표면 온도가 전체적으로 상승하는 것으로 사료된다.

- (2) 깊이 방향으로의 열전도율을 확인하기 위하여 위치는 열원의 반경 끝부분인 Position 1, Position 2(4.23mm), Position 3(11.256mm), Position 4(24.845mm)위치에서 깊이 방향으로 표면(0mm), 1mm, 2mm, 3mm 위치의 온도를 확인하였다. 그 결과, Feed속도가 빨라질수록 표면의 온도는 상승하나 깊이 방향으로 열이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 빠른 Feed속도로 인하여 내부까지 열전달이 충분히 이루어지지 않는 것으로 사료된다.
- (3) MCT장치에 실제 적용하여 공인된 시험을 통해 다양한 가공 조건을 도출하고 있으며, 본 연구를 통해 나타난 Feed속도에 따른 열 분포에 대한 자료는 시험조건을 설정 및 가공 조건도출, 자동화 공정 계획의 DB로 활용 가능성이 높다고 사료된다.

사 사

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

참고문헌

- [1] J. H. Park, S. H. Park, G. N. Kim “A Study on the Thermo-Mechanical coupling analysis to

- Working Condition of LAM”, Journal of Korean Society of Industry Convergence, Vol.25(No.6), pp.1127-1134, (2022).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [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).

(접수: 2023.11.06. 수정: 2023.11.20. 게재확정: 2023.11.30.)