

• 특집 • 직선 • 회전모터 구동 이송 • 회전체 연구 XVII

레이저보조가공에 의한 터닝센터가공 특성에 관한 연구

A Study on the Machining Characteristics of a Turning-Center by Laser Assisted Machining

이춘만^{1,#}, 김은중¹

Choon-Man Lee^{1,#} and Eun Jung Kim¹

¹ 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National University)

Corresponding Author / E-mail: cmlee@changwon.ac.kr, TEL: +82-55-213-3622

ORCID: 0000-0002-3401-6866

KEYWORDS: Laser assisted machining (레이저 보조가공), Turning center (터닝센터), Cutting force (절삭력), Surface roughness (표면거칠기)

This paper is a study of the machining characteristics, cutting force and surface roughness of a turning center by laser-assisted machining. The laser-assisted machining (LAM) is an effective method to improve the machinability of difficult-to-cut materials. The LAM has recently been studied for various machining processes, but the research on the three-dimensional and turning-center machining is still insufficient. In this study, a machining experiment of the turning-center process was performed by the laser-assisted machining with Inconel 718. Before the machining experiment, performed to thermal analysis was for a selected to effective depth of cut. The cutting force and surface roughness were compared and analyzed. The machining experiment confirmed that the machinability was improved in the LAM.

Manuscript received: April 11, 2018 / Revised: May 16, 2018. / Accepted: May 16, 2018

1. 서론

최근 산업의 급진적인 발전으로 인하여 고성능의 제품들에 대한 연구와 출시가 다양한 산업군에서 발생하고 있다. 특히, 정보통신, 반도체, 산업용 플랜트, 신재생 에너지, 자동차, 우주항공 분야에서는 다양한 작업환경에 적용이 가능한 부품에 대한 수요가 크게 증가하고 있다. 이러한 환경에 적용이 가능한 소재는 경량이며 내부식성과 내열성이 높고 비강도가 높은 소재를 사용하여 제작하고 있으며 대표적으로 티타늄합금, 스테인리스강, 니켈계열 합금, 복합소재 등이 있다. 그러나 이러한 소재들은 가공성이 낮아 일반적인 가공방법으로는 가공이 어렵다는 단점이 있다.^{1,2}

이러한 이유로 가공이 어려운 소재의 가공성을 높이기 위한 여러 가지 연구가 활발히 진행되고 있다. 가공 방법으로는 극저온가공(Cryogenic Machining), 열보조가공(Thermally Assisted Machining)이 가장 활발하게 연구가 진행되고 있는 분야다. 또한, 열보조

가공에서 레이저 보조가공(Laser Assisted Machining)은 레이저를 보조 열원으로 사용하는 방법으로 가장 효율적인 방법으로 평가되고 있다.³⁻⁶

Kim 등은 Inconel 718을 이용한 레이저 보조가공의 예열온도와 절삭력을 측정하는 연구를 진행하였으며,⁷ Ito 등은 레이저 보조가공을 이용하여 유리곡면의 정밀가공에 대한 연구를 수행하였다.⁸ Tadavani 등은 펄스 레이저를 이용한 레이저 보조가공을 수행하였으며,⁹ Kong 등은 레이저 보조가공을 이용한 금속복합재료의 초경공구의 마모에 관한 연구를 수행하였다.¹⁰ 본 연구자는 4잎, 8잎의 트로코이드 치형 가공을 5축 머시닝센터에 의한 턴밀링(Turn-Milling) 가공 연구를 수행한 바 있다.¹¹ 본 연구에서는 터닝센터에 의한 연구로 절삭방향과 레이저 예열방향이 다르다.

터닝센터(Turning-Center)는 선삭가공(Turning)과 밀링가공(Milling)이 결합된 가공방법으로 일반적인 선삭가공이나 밀링가공에 비해 공정수를 줄일 수 있다. 또한, 다양한 형상의 가공이

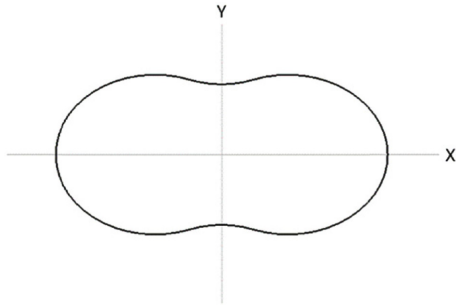


Fig. 1 2-leaf curved profile

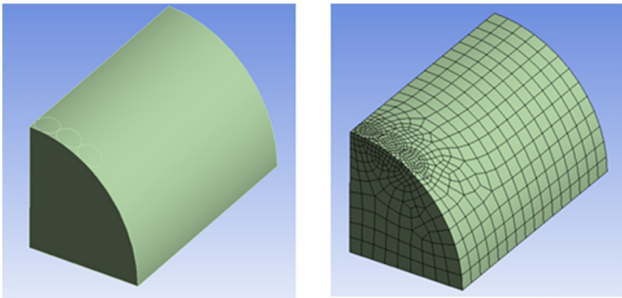


Fig. 2 Analysis model

한번의 척킹(Chucking)으로 가능하기 때문에 활용성이 높은 장비이다. Karaguzel 등은 턴밀링 공정에서 공구의 위치보정의 영향에 관한 연구를 수행하였으며,¹² Wu 등은 터닝센터 공정의 열변위 오차와 실시간보상에 관한 연구를 수행하였다.¹³

레이저 보조가공은 단일공정이나, 단순한 2차원 형상의 가공에 대한 연구가 주로 이루어 지고 있고, 항공기나 엔진부품 등의 3차원 형상이나 다양한 가공공정에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구의 목적은 터닝센터 공정에 레이저 보조가공을 적용하여 가공성을 평가하는데 있다. 이를 위하여 실험 전에 유한요소해석을 통하여 적절한 절삭깊이를 선정하였다. 또한, 회전수와 이송속도 등의 가공조건을 선정하고 가공실험을 수행하여 가공특성을 분석하였다.

2. 극좌표 방정식

2.1 극좌표 방정식에 의한 곡선정의

터닝센터에 레이저 보조가공을 적용하여 가공하기 위한 소재로 다양한 형상의 정의가 가능한 식(1)의 극좌표 방정식(Polar Equation)을 이용하여 형상을 정의하였다.¹⁴ 본 연구에서는 2개의 잎(Leaf)을 가지는 형상을 선정하였다. 이러한 형상은 프로펠러나 기어펌프 등에 사용된다. 식(1)의 k 값은 곡선의 잎의 개수를 나타내며, a와 b의 크기에 따라 곡선의 길이와 높이가 정해진다. 여기서는 k=2로 선정하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 2잎형상의 그림이다.

$$r = a + b \cos k\theta \tag{1}$$

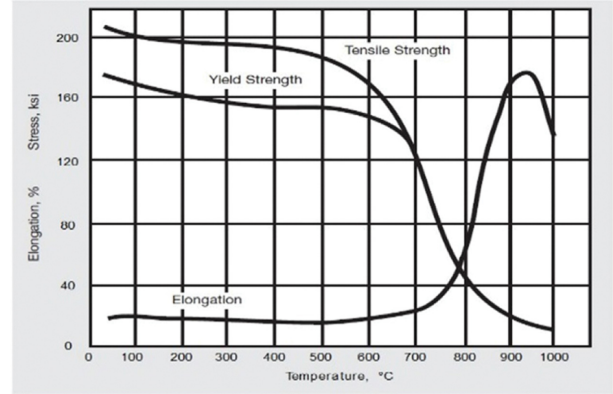


Fig. 3 Properties of Inconel 718 according to temperature

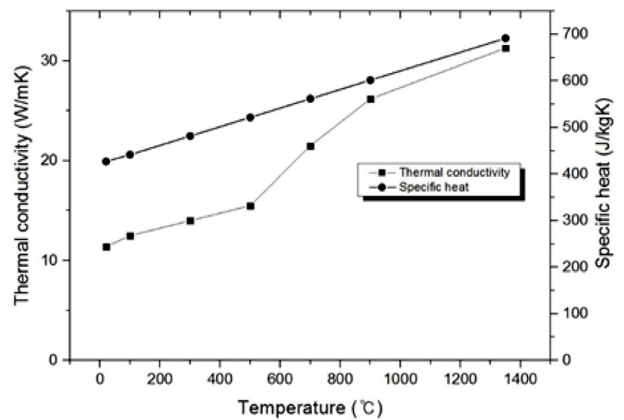


Fig. 4 Specific heat and thermal conductivity

3. 유한요소해석

3.1 유한요소해석

유한요소해석을 통하여 레이저가 조사될 때 절삭 깊이를 선정하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 상용해석프로그램인 ANSYS Workbench이다. 해석은 1/4모델을 사용하여 수행하였다. 해석에 사용된 매쉬(Mesh)는 육면체 매쉬(Hexagonal Dominant)를 사용하였다. 열원의 크기는 3 mm이며, 매쉬의 크기는 5 mm와 열원이 조사되는 부분에는 0.5 mm로 조밀하게 하였으며, 레이저의 출력은 150 W로 선정하였다. 절점(Nodes)은 2,707개이며, 요소(Element)는 3,406개이다. Fig. 2는 해석에 사용된 해석모델을 나타낸다.

3.2 유한요소해석 결과

실험에 사용된 소재인 Inconel 718는 온도변화에 따라서 약 750°C 연신율이 증가하며 약 950°C에서 최대가 되는 물성치의 변화에 따라 레이저를 표면에 조사하였을 때 발생하는 표면에서부터 중심방향까지의 온도분포를 참고하여 950-750°C까지의 온도분포를 유효 절삭 깊이로 선정하였다.

유한요소해석결과 표면에서 0.3 mm의 깊이로 유효 절삭 깊이를 선정하였다. Fig. 3은 Inconel 718의 온도에 따른 물성치의

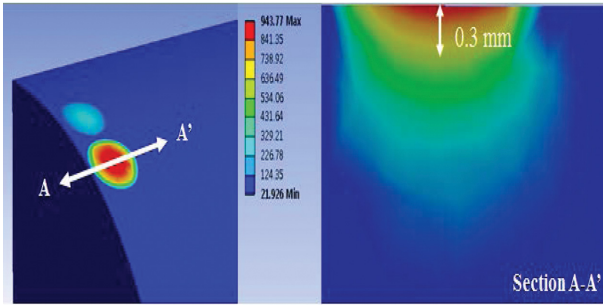


Fig. 5 Result of analysis

Table 1 Machining conditions

Material	Inconel 718
Tool	D10, 2F, 80L
Spindle speed [rpm]	6,000 / 8,000 / 10,000
Feed rate [mm]	100 / 200
Depth of cut [mm]	0.3
Laser spot size [mm]	3
Laser wave length [nm]	920-980

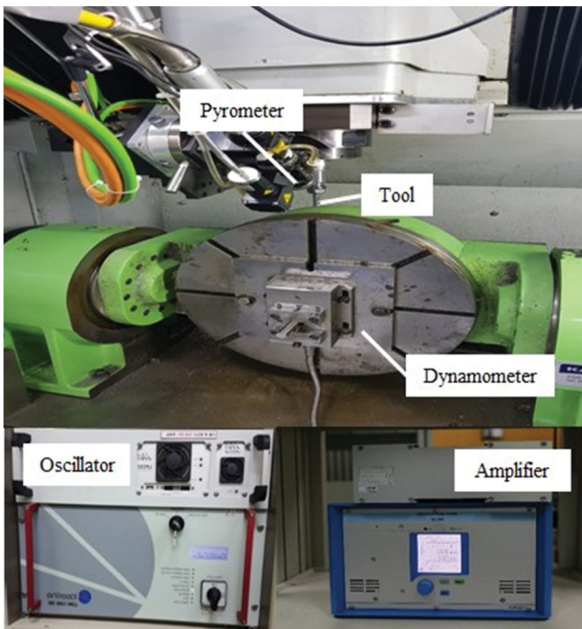


Fig. 6 Experimental set-up



Fig. 7 Results of machining experiment

변화를 나타낸다. Fig. 4는 해석에 사용된 비열(Specific Heat)과 열전도도(Thermal Conductivity)를 나타낸다. Fig. 5는 해석결과를 나타낸다.

4. 가공실험 장치의 구성과 가공조건

실험을 진행하기 위해 Fig. 6과 같이 실험장치를 구성하였다. Table 1은 가공조건을 나타낸다. 5축 톨링 테이블 머시닝센터는 Hyundai-WIA의 HI-V560 장비를 사용하였다. 레이저 장치는 머시닝센터의 스피indle에 별도의 장치를 제작하여 부착하였으며, 레이저는 Laserline의 LDM 1000-100을 사용하였다. 레이저 파장은 920-980 nm이며 1 kW의 출력을 가지는 고휒력 다이오드 레이저(High Power Diode Laser)를 사용하였다. 실시간으로 온도를 측정하기 위해 Dr. Merhenthaler의 LPC03 고온계(Pyrometer)를 사용하였다.

절삭력을 측정하기 위해서 Kistler의 9257B공구동력계를 사용하였다. 또한, 절삭력을 실시간으로 모니터링 하기 위해서 다채널

증폭기(Multi-Channel Amplifier)를 통해 데이터 수집장치 (Data Acquisition)에서 연결된 컴퓨터를 통해 모니터링이 가능한 시스템을 구축하였다.

실험에 사용된 소재는 Inconel 718이며, 절삭공구는 외경 10 mm의 초경 앤드밀(Tungsten Carbide End-Mill)을 사용하였다. 스피indle의 회전속도는 6,000, 8,000, 10,000 rpm 3가지 조건과 이송속도 100, 200 mm 2가지 조건을 변수로 정하고 절삭 깊이는 해석을 바탕으로 0.3 mm로 고정하고 실험을 진행하였다.

5. 가공실험 결과

레이저 보조가공을 이용한 터닝센터 공정의 가공성을 분석하기 위해 선정된 가공조건에 따라 가공 실험을 수행하였다. 측정데이터의 신뢰성 향상을 위해 3회 반복실험을 진행하였으며, 각각의 실험마다 공구와 소재를 따로 사용하여 보다 더 정확한 데이터를 얻고자 하였다. Fig. 7은 레이저 보조가공을 이용한 터닝센터 가공에서 가공된 2일 형상의 시편을 나타낸다.

5.1 절삭력 분석

절삭력을 분석하기 위해 터닝센터 공정의 레이저 보조가공과 일반가공(Conventional Machining)을 비교하였다. Fig. 8은 이송속도 100 mm일 때의 레이저 보조가공과 일반가공의 절삭력을 나타내며, Fig. 9는 이송속도 200 mm일 때의 레이저 보조가공과 일반가공의 절삭력을 나타낸다. 스피indle 회전속도가 증가할수록

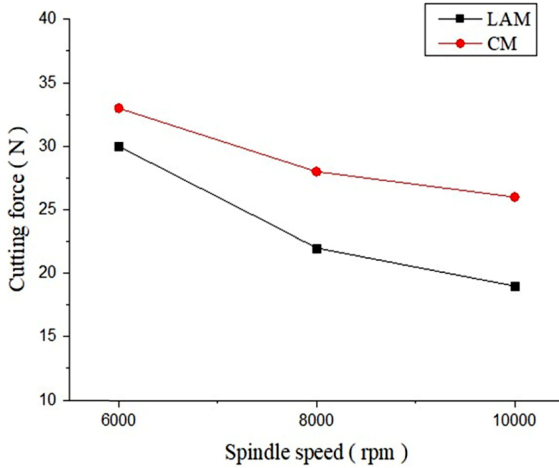


Fig. 8 Cutting force of feed rate 100 mm/min

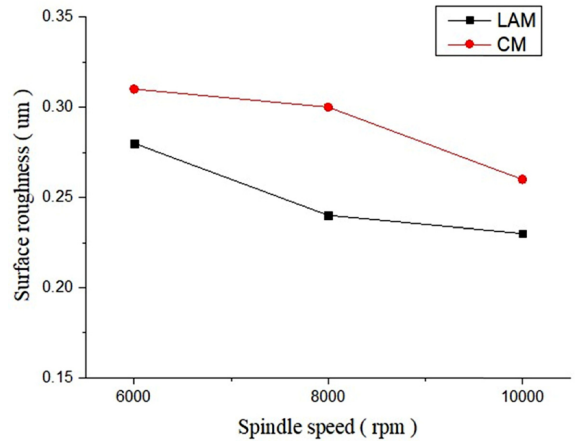


Fig. 10 Surface roughness of feed rate 100 mm/min

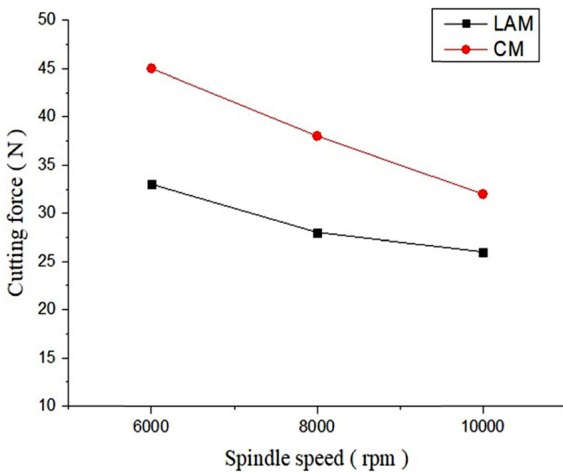


Fig. 9 Cutting force of feed rate 200 mm/min

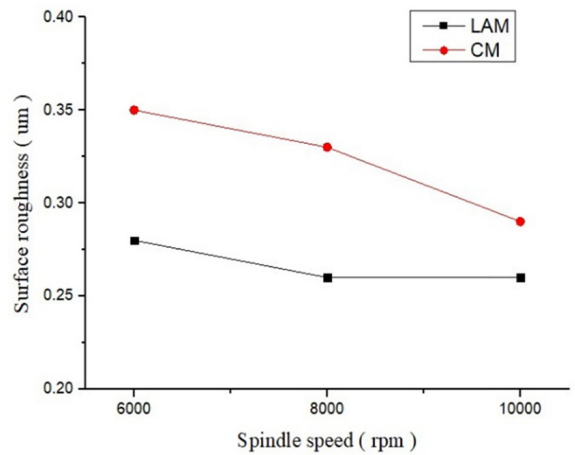


Fig. 11 Surface roughness of feed rate 200 mm/min

절삭력은 감소하였고, 이송속도가 증가할수록 절삭력도 증가하였다. 일반가공과 레이저 보조가공을 비교하였을 때는 가공조건에 상관없이 모두 절삭력이 개선됨을 확인하였다. 이송속도가 100 mm일 때는 회전수 10,000 rpm일 때 최대 26%가 개선되었으며, 200 mm일 때는 회전수 8,000 rpm일 때 최대 27%가 개선됨을 확인하였다.

5.2 표면거칠기 분석

가공 실험을 수행한 후 표면거칠기를 측정하였다. 표면거칠기는 중심선평균거칠기(Arithmetical Average Roughness, Ra)를 사용하였으며, 표면거칠기의 컷오프(Cut-Off)값은 0.8 mm, 측정길이는 5 mm를 적용하고 측정하였다. Fig. 10은 이송속도가 100 mm일 때, Fig. 11은 이송속도가 200 mm일 때의 표면거칠기를 나타낸다. 일반가공과 레이저 보조가공을 비교하였을 때 이송속도가 100 mm일 때 회전수가 8,000 rpm일 때 최대 20%가 개선되었으며, 이송속도가 200 mm일 때는 회전수가 8,000 rpm일 때 21%가 개선됨을 확인하였다.

6. 결론

레이저 보조가공을 적용한 터닝센터의 가공성을 분석하기 위해 2일 형상의 시편을 이용하여 실험을 진행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다양한 형상을 정의하는 극좌표 방정식을 이용하여 터닝센터 공정의 가공성을 평가하는 형상을 정의하였다.
- (2) 실험을 진행하기에 앞서 가공실험에서의 유효절삭깊이를 얻기 위해 해석을 진행하였으며, 해석결과를 바탕으로 유효절삭깊이를 선정하였다.
- (3) 터닝센터공정에 레이저 보조가공을 적용하기 위해 적절한 가공장비를 구축하였으며 공구와 소재에 따라 적절한 가공조건을 선정하였다.
- (4) 이송속도를 증가시켰을 때 모두 절삭력이 증가되었다. 레이저 보조가공과 일반가공을 비교하였을 때 이송속도가 100 mm일 때는 회전속도 10,000 rpm 에서 절삭력이 가장 크게 감소하였고, 200 mm일 때는 회전속도 8,000 rpm에서 절삭력이 가장 크게 감소

하였다. 특히, 이송속도 100 mm, 회전수 10,000 rpm일 때 절삭력의 감소가 가장 크게 나타났다. 회전수가 증가 할수록 절삭력은 감소하였으며, 이송속도가 낮을수록 절삭력이 감소함을 확인하였다.

(5) 표면거칠기는 이송속도가 낮을수록 감소하였으며 회전수가 10,000 rpm일 때는 LAM에 의한 표면거칠기의 감소효과가 떨어지는 것을 확인하였다.

향후 본 연구 내용을 바탕으로 다양한 가공공정에 레이저 보조 가공을 적용하기 위한 최적 가공조건에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2017-2018년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

REFERENCES

- Jia, Q. and Gu, D., "Selective Laser Melting Additive Manufacturing of Inconel 718 Superalloy Parts: Densification, Microstructure and Properties," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 585, pp. 713-721, 2014.
- Lee, C.-M., Woo, W.-S., Kim, D.-H., Oh, W.-J., and Oh, N.-S., "Laser-Assisted Hybrid Processes: A Review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 2, pp. 257-267, 2016.
- Ding, H., Shen, N., and Shin, Y. C., "Thermal and Mechanical Modeling Analysis of Laser-Assisted Micro-Milling of Difficult-to-Machine Alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 3, pp. 601-613, 2012.
- Kumar, M. and Melkote, S. N., "Process Capability Study of Laser Assisted Micro Milling of a Hard-to-Machine Material," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, No. 1, pp. 41-51, 2012.
- Brecher, C., Emonts, M., Rosen, C.-J., and Hermani, J.-P., "Laser-Assisted Milling of Advanced Materials," *Physics Procedia*, Vol. 12, pp. 599-606, 2011.
- Birmingham, M., Schaffarzyk, P., Palanisamy, S., and Dargusch, M., "Laser-Assisted Milling Strategies with Different Cutting Tool Paths," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 74, Nos. 9-12, pp. 1487-1494, 2014.
- Kim, D.-H. and Lee, C.-M., "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.
- Ito, Y., Ueki, M., Kizaki, T., Sugita, N., and Mitsuishi, M., "Precision Cutting of Glass by Laser-Assisted Machining," *Procedia Manufacturing*, Vol. 7, pp. 240-245, 2017.
- Tadavani, S. A., Razavi, R. S., and Vafaei, R., "Pulsed Laser-Assisted Machining of Inconel 718 Superalloy," *Optics & Laser Technology*, Vol. 87, pp. 72-78, 2017.
- Kong, X., Zhang, H., Yang, L., Chi, G., and Wang, Y., "Carbide Tool Wear Mechanisms in Laser-Assisted Machining of Metal Matrix Composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, Nos. 1-4, pp. 365-379, 2016.
- Lee, C. M., and Ahn, J. W., "A Study on the Evaluation of Machining Characteristics of Trochoidal Profile by Turn-Mill," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 33, No. 2, pp. 95-100, 2016.
- Karaguzel, U., Uysal, E., Budak, E., and Bakkal, M., "Effects of Tool Axis Offset in Turn-Milling Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 231, pp. 239-247, 2016.
- Hao, W., Hongtao, Z., Qianjian, G., Xiushan, W., and Jianguo, Y., "Thermal Error Optimization Modeling and Real-Time Compensation on a CNC Turning Center," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 207, Nos. 1-3, pp. 172-179, 2008.
- Choi, B. G., You, W. S., Jeon, C. S., Pyeon, Y. S., et al., "CAD/CAM System and CNC Cutting," <http://www.aladin.co.kr/shop/wproduct.aspx?ItemId=176987> (Accessed 25 MAY 2018)