



CAD/CAE/CAM을 활용한 금형형상 가공에 관한 연구

한규택^{a*}

A Study on the Die Shape Machining using CAD/CAE/CAM System

Kyu Taek Han^{a*}^a Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	3	January	2022
Revised	1	February	2022
Accepted	14	February	2022

Keywords:

CAD/CAE/CAM system
Effective machining
Toolpath
Surface roughness

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the relationship between the surface roughness and cutting force for the die shape and factor change using CAD/CAE/CAM. RPM, feed rate, and step over were chosen as the main factor for cutting force. To estimate the correlation between cutting force and surface roughness, cutting force was predicted using the DOE (design of experiments) and DEFORMTM-3D (software of finite element analysis), surface roughness was measured through experiments. The optimal level for each factor was considered, and the most effective factor was evaluated using the Taguchi method (one of DOE). In this study, the machining conditions to obtain a particular surface roughness based on the measured value were derived.

1. 서론

제조 최근의 다품종 소량생산체제에 의해 제품의 형상이 복잡해지고 고정밀도와 고품질이 요구되어 제품 및 금형가공에 대한 문제가 연구의 대상이 되고 있다. 최근에는 CNC 밀링 가공만으로도 원하는 정밀도를 얻을 수 있게 되어 후처리 가공공정을 최소화시킴으로써 생산성을 향상시킬 수 있게 되었다^[1-3].

이에 따라 CNC 밀링 가공의 가공정밀도 및 가공효율을 증가시키는 방법에 대한 연구가 지속적으로 이어지고 있다. 절삭력에 관한 연구는 오래전부터 수행되어 왔으며, Shaw는 전단각(shear angle)과 전단면(shear plane)의 결정을 통해 절삭력을 구하는 방법을 제시하였고^[4], Altintas 등, Minis 등은 직선 엔드밀 가공에 있어서 일정한 비절삭 압력과 절삭력 비를 제시하였고^[5-6], Lee 등은 칩 부하와 절삭 기하학 및 절삭력과 칩 부하 사이의 관계에 대해 연구하였으며^[7], Choi 등, Park 등은 절삭력과 표면조도의

상관관계에 대해 연구하였다^[8-9]. 기존의 연구를 분석하면 절삭가공에서 잔류응력과 표면조도는 주축 회전속도가 높을수록, 절삭날의 이송속도가 작을수록 표면조도가 좋아지는 것으로 나타났다. 하지만 알루미늄 재료의 가공 후 표면조도에 대한 연구는 부족한 편이다. 특히 Al6061은 신발 밑창 등의 고무재질을 생산하기 위한 사출금형의 재료로 많이 사용되고 있지만 가공에 대한 절삭력과 표면조도에 대한 연구는 부족하다. 또한 최근 제조업체에서는 비용 절감과 효율을 높이기 위해 일관 생산시스템을 지향하고 있다^[10-16].

따라서 본 연구에서는 통합된 CAD/CAE/CAM 시스템을 활용하여 금형형상(평면/경사면)의 가공인자의 변화에 따른 표면조도 및 인자간 상관관계 규명에 대한 연구를 하였다.

본 연구의 기존 연구와의 차별적 특징은 절삭력을 해석하기 위해서 실험계획법과 CAE 소프트웨어인 DEFORMTM-3D를 사용한 것이다. 절삭력에 대한 주요인자로 RPM과 절삭이송속도, 절입

* Corresponding author. Tel.: +82-51-629-6135

E-mail address: kthan@pknu.ac.kr (kyu Taek Han).

량(step over)을 선택하였다. 그리고 다구찌 기법을 사용하여 가장 큰 영향력을 미치는 인자를 조사하였고, 측정된 표면조도와 가공 시간을 바탕으로 알루미늄 소재에 대한 효율적인 가공조건도 조사하였다. 또한 실험을 통해 표면조도를 측정하여 절삭력과 표면조도의 상관성도 고찰하였다.

2. 본 론

연구방법은 Fig. 1과 같이 실험계획법의 프로그램인 MINITAP14를 통해 해석 조건 및 실험 조건을 계획하였고, 본 연구에 사용된 소프트웨어는 국내의 정밀금형 가공업계에서 널리 사용되고 있으며, 효율적인 가공을 위한 가공물의 형상 모델링은 Autodesk사의 PowerSHAPE™로 하였으며 또한 실험에 사용될 NC데이터는 가공 전용프로그램인 PowerMILL™을 사용하여 생성하였다(Fig. 2). 즉, CAD 소프트웨어인 PowerSHAPE를 이용하여 공구와 소재를 모델링 하였으며, CAE 소프트웨어인 DEFORM™-3D를 이용하여 절삭력을 해석하였다. CAM 소프트웨어인 PowerMILL의 모의가공 기능을 이용하여 오류를 체크한 후 NC코드를 출력하였다. 출력된 NC코드로 PowerMILL과 연동되는 CNC밀링머신인 NBS-2025를 이용하여 가공을 하였고, 가공된 시편을 표면조도측정기를 통해 표면조도를 측정하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석순서 및 조건선정

본 연구에서는 Al6061의 절삭력과 표면조도의 상관관계에 대해

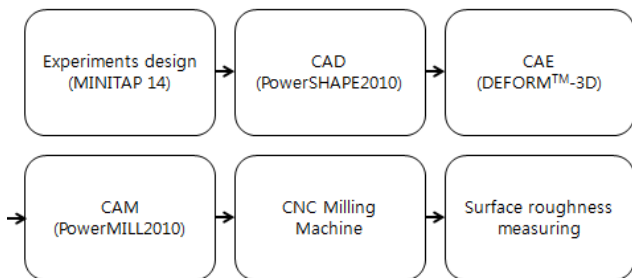


Fig. 1 Flow chart of research

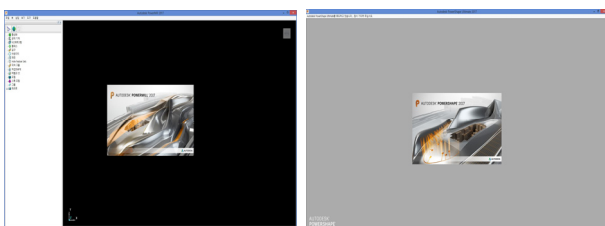


Fig. 2 PowerSHAPE™ and PowerMILL™ S/W

Table 1 Orthogonal array using the Taguchi method

	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Table 2 Machining conditions

No.	RPM	Feed rate (mm/min)	Step over (mm)
1	13000	200	1.5
2	13000	190	1.4
3	13000	180	1.3
4	12000	200	1.4
5	12000	190	1.3
6	12000	180	1.5
7	14000	200	1.3
8	14000	190	1.5
9	14000	180	1.4

실험계획법을 사용하여 알아보기 위해 DEFORM™-3D를 통해 절삭력을 해석하고 같은 조건에서 실험하여 비교하고자 하였다.

먼저 MINITAP14의 다구찌 설계를 통해 Table 1과 같은 직교배열표를 얻었고, A를 ‘스핀들회전수’, B를 ‘절삭이송속도’, C를 ‘절입량(step over)’으로 치환하였다. 스핀들회전수의 1조건은 ‘13000’, 2조건은 ‘12000’, 3조건은 ‘14000’으로 하였고, 절삭이송속도의 1조건은 ‘200’, 2조건은 ‘190’, 3조건은 ‘180’으로, 절입량의 1조건은 ‘1.5’, 2조건은 ‘1.4’, 3조건은 ‘1.3’으로 하여 Table 2와 같이 직교배열표를 완성하였다. 각 조건은 해석의 검증에 위해 사용될 소형 CNC의 가공조건을 참고하여 작성되었다.

3.2 유한요소 모델생성

해석을 위한 공구의 모델은 실제 실험을 통해 사용될 공구를 Autodesk사의 CAD 소프트웨어인 PowerSHAPE를 사용하여 모델링하였다. Fig. 3은 모델링 형상을 나타낸다.

해석을 위한 모델은 Fig. 4와 같다. 공구는 강체(rigid body)로 가정하였고, 소재는 Al6061이며, 강소성체(rigid-plastic body)로 가정하였다.

소재의 크기는 40 mm × 40 mm × 40 mm로 설정하였고, 공구

의 진행방향은 -X 축 방향이고, 공구의 마모는 고려하지 않았다. 해의 수렴 정확성을 높이기 위해 메쉬(mesh)의 크기를 0.8 mm까지 나누고, 최소 0.01 mm까지 remesh를 허용하였다. 해석 과정에서의 remesh 과정을 최소화하기 위해 Fig. 5와 같이 공구의 진행 방향에 맞추어 해석 과정에서 공구가 실제로 절삭하는 부분에 대해서만 메쉬를 세밀하게 구성하였다.



Fig. 3 Model of tool shape

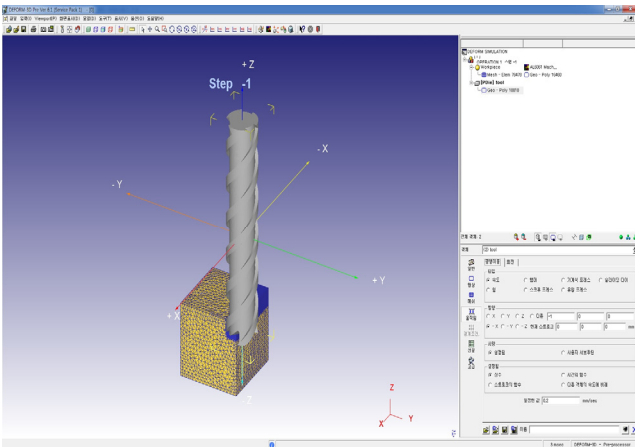


Fig. 4 Simulation model of workpiece & tool

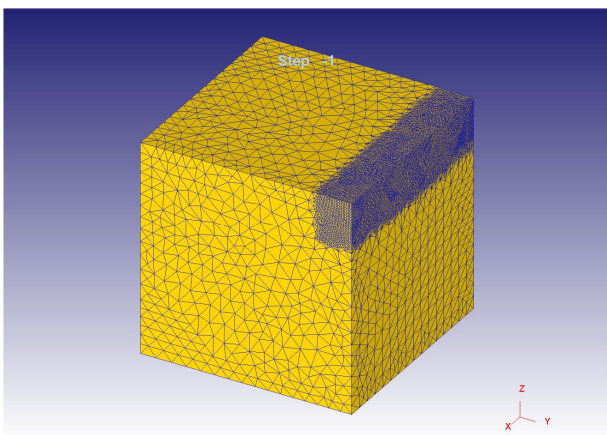


Fig. 5 Mesh generation for analysis

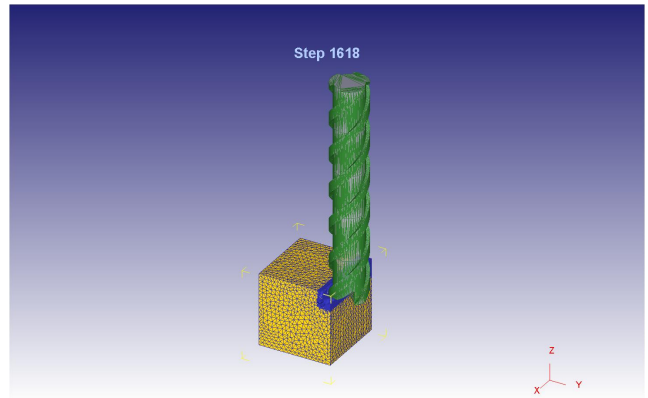
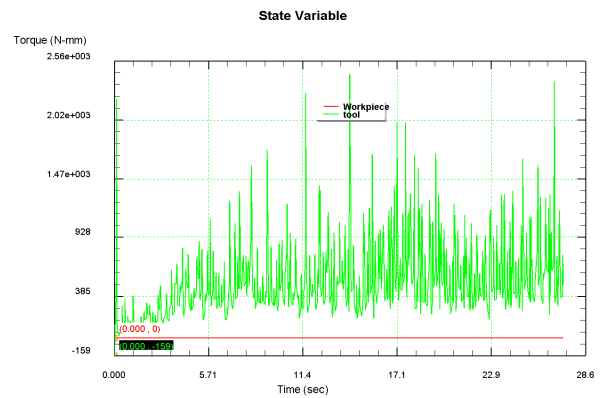


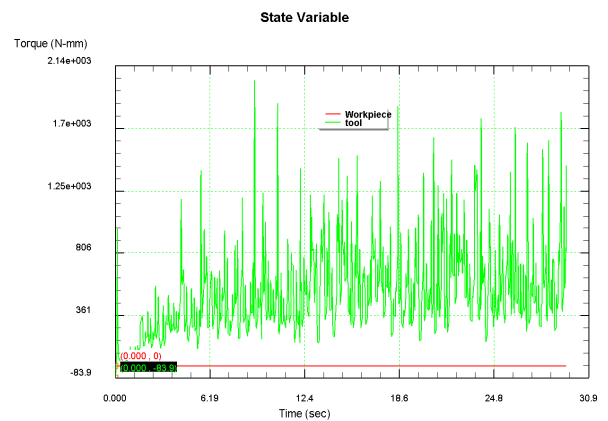
Fig. 6 Simulated machining process

각 해석은 Fig. 6과 같이 1500~1700 step 까지 진행하였고, 각 조건의 변화에 대한 절삭력의 경향을 파악하기 위해 공구에 대한 토크(torque) 값을 데이터로 선택하였다.

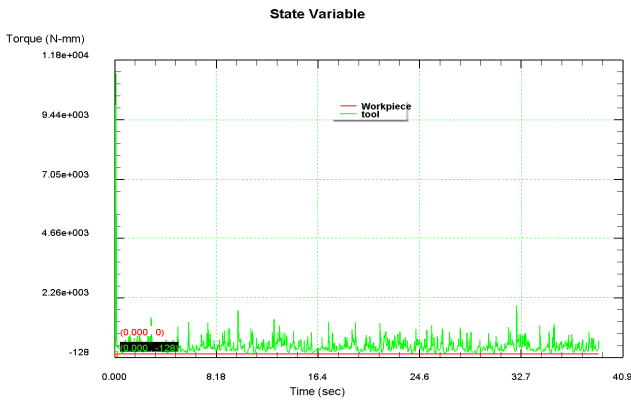
또한 메쉬의 크기에 따른 결과의 변화를 확인하기 위해 동일한 조건에서 메쉬의 크기를 변경하여 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있었고, 그 결과를 비교한 결과 Fig. 8과 같이 모두



(a) Mesh 0.5 mm



(b) Mesh 0.7 mm



(c) Mesh 0.8 mm

Fig. 7 Torque-time curve for cutting force

근사한 결과를 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 메쉬의 크기를 0.7 mm로 설정하여 모든 가공조건에서 해석하였으며 그 중 No.2, 4, 7, 8, 9에 대해 시뮬레이션 한 결과만 나타냈으며 Fig. 9 ~ 13 과 같다. 이것은 Fig. 14와 같이 메쉬의 크기를 0.8 mm로 설정하여 구한 결과와도 유사함을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서 사용된 DEFORMTM-3D의 시뮬레이션 결과는 타당하다 할 수 있다.

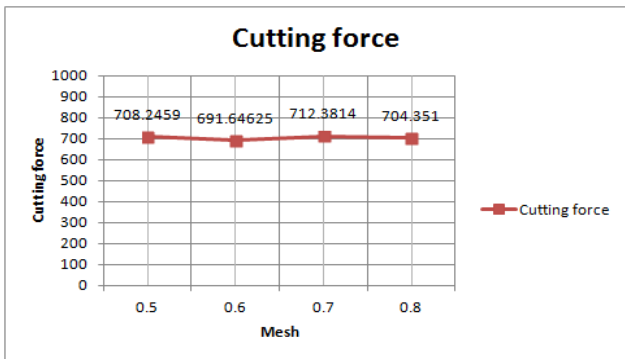


Fig. 8 Graph of cutting force-mesh

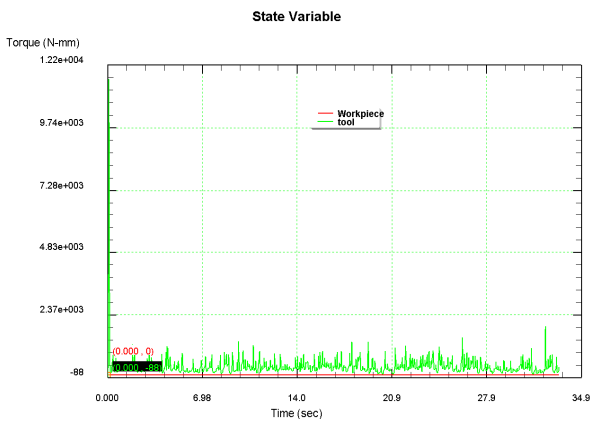


Fig. 9 Torque-time curve for cutting force in experiment No.2 (mesh 0.7 mm)

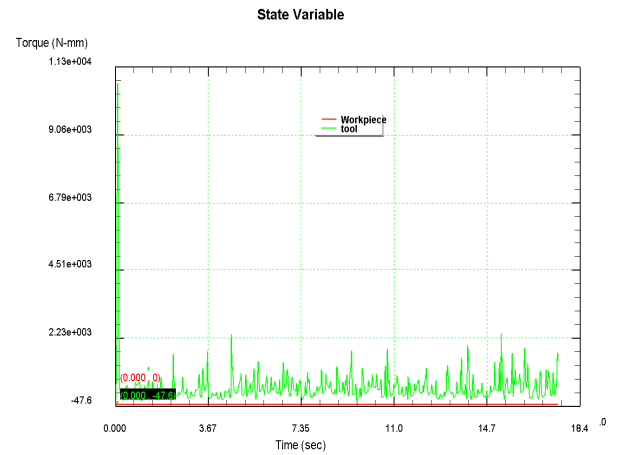


Fig. 10 Torque-time curve for cutting force in experiment No.4 (mesh 0.7 mm)

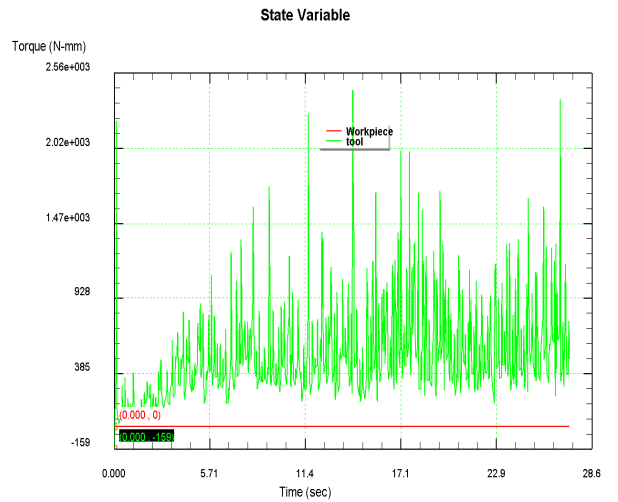


Fig. 11 Torque-time curve for cutting force in experiment No.7 (mesh 0.7 mm)

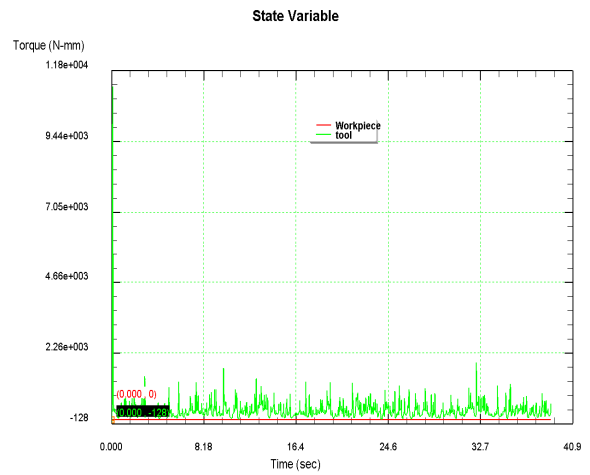


Fig. 12 Torque-time curve for cutting force in experiment No.8 (mesh 0.7 mm)

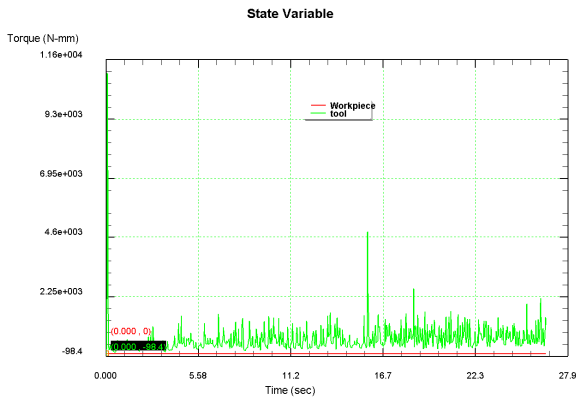


Fig. 13 Torque-time curve for cutting force in experiment No.9 (mesh 0.7 mm)

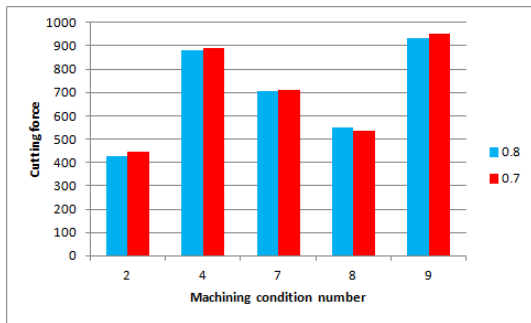


Fig. 14 Graph of cutting force-machining conditio

Table 3 Response table for S/N ratio

Level	RPM	Feed rate	Step over
1	-56.41	-58.13	-58.62
2	-58.88	-57.45	-56.84
3	-55.71	-55.42	-55.54
Delta	3.16	2.71	3.08
Rank	1	3	2

Table 4 Response table for average

Level	RPM	Feed rate	Step over
1	690.6	825.4	856.7
2	880.7	747.4	717.2
3	618.1	616.6	615.6
Delta	262.6	208.8	241.1
Rank	1	3	2

Table 5 ANOVA for the S/N ratio

	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
RPM	2	16.5765	16.5765	8.2882	40.27	0.024
Feed rate	2	11.9478	11.9478	5.9739	29.03	0.033
Step over	2	14.3215	14.3215	7.1608	34.79	0.028
Error	2	0.4116	0.4116	0.2058		
Total	8	43.2574				

Table 6 ANOVA for the average

	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
RPM	2	110346	110346	55173	49.72	0.02
Feed rate	2	66789	66789	33394	30.09	0.032
Step over	2	87899	87899	43949	39.6	0.025
Error	2	2220	2220	1110		
Total	8	267253				

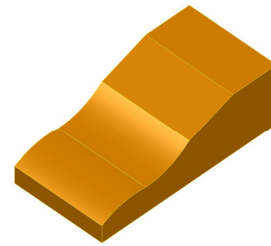


Fig. 15 Workpiece model for investigation surface roughness using PowerSHAPE

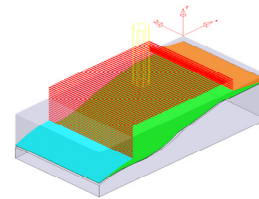


Fig. 16 Tool path generation using PowerMILL

4. 유한요소해석 결과 및 고찰

해석 결과 각 조건에 대한 그래프를 얻을 수 있었다. Fig. 9 ~ 13의 그래프 결과를 데이터로 추출하여 평균값을 취하여 일반화 하였고, 이를 MINITAP 14의 다구찌 기법을 사용하여 우선순위를 알아보았다. 여기서 S/N비에 대한 주효과와 평균에 대한 주효과를 분석해 본 결과 RPM의 값은 낮아질수록 절삭력이 커지고, 절삭이송속도, 절입량의 값은 감소할수록 절삭력 또한 감소함을 알 수 있었다. 이는 일반적으로 알려진 절삭력에 관한 이론과 일치하는 결과이므로, 본 해석의 결과 또한 타당하다는 의미를 가진다.

Table 3과 Table 4는 각각 S/N비에 대한 반응 표와 평균에 대한 반응 표를 나타낸다. 또한 Table 5과 Table 6에서 S/N비와 평균에 대한 분산분석표를 나타내었다. 각 요인들의 S/N비와 주효과에 대해 F검정을 실시하였고, 그 결과 3가지 요인 모두 분산분석에서 95%의 유의성(신뢰수준)을 가진다. Table에서 델타(최대값-최소값)값은 그 차이가 클수록 해당 인자의 영향이 크

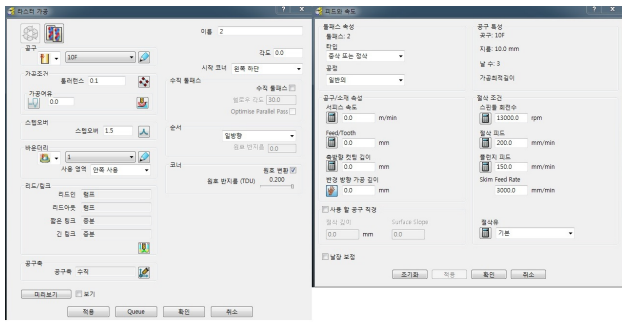


Fig. 17 Setup menu of machining conditions

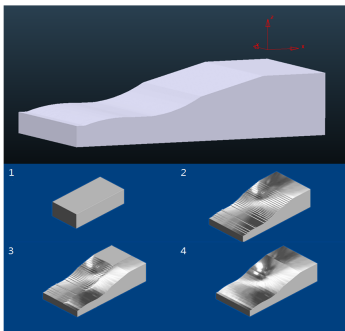


Fig. 18 Simulation of cutting process using ViewMILL function of PowerMILL

다는 것을 의미한다. 이에 따라 각 요인의 순위를 나타내었고, 순위가 높을수록 해당 인자의 변동에 따른 결과 값의 변동 또한 커진다는 것을 의미한다. 따라서 3가지 요인 중 RPM이 절삭력에 가장 큰 영향력을 가지고, 영향력이 두 번째로 큰 요인은 절입량, 3가지 요인 중 가장 영향력이 작은 요인은 절삭이송속도로 나타났다.

5. CAD/CAM시스템에 의한 모의가공 시뮬레이션

5.1 가공모델 생성

실험에는 140 mm × 70 mm × 40 mm 크기의 소재가 사용되었다. 그리고 평면, 경사면에 대한 표면조도를 알아보기 위해 Fig. 15의 형상을 상용 CAD소프트웨어인 PowerSHAPE를 사용하여 모델링하였다.

5.2 가공경로 생성

Fig. 16은 CAM 소프트웨어인 PowerMILL을 사용하여 가공경로가 생성된 것을 나타낸다. Fig. 17은 가공경로의 생성을 위해 본 실험의 인자인 RPM과 절삭이송속도, 절입량을 설정하는 창을 나타낸다.



Fig. 19 Photo of milling machine(NBS-2025)



Fig. 20 Photo of surface roughness measuring instrument (SJ-310)

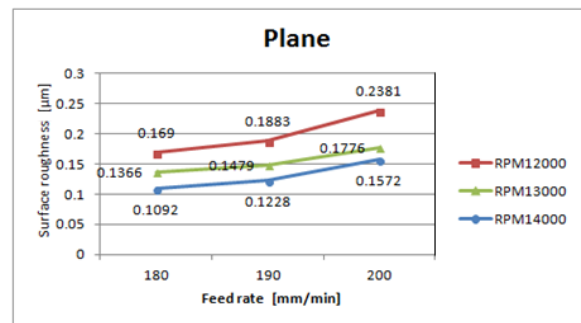


Fig. 21 Surface roughness according to rpm, step over and feed rate in plane

5.3 모의가공

Fig. 18은 PowerMILL을 사용하여 모의가공을 진행한 것을 나타낸다. 실제 가공을 시작하기에 앞서 모의가공을 통해 과절삭의 유무 등 가공공정에서 발생할 수 있는 오류를 미리 제거할 수 있고, 표면의 형상을 확인할 수 있다.

6. 실험

6.1 실험장치 및 방법

가공할 모델을 먼저 CAM프로그램인 PowerMILL을 통해 가공경로를 계산하고, NC코드를 출력하여 Fig. 19과 같은 CNC밀링머신으로 가공한 후 가공된 모델의 표면조도를 표면조도측정기를 활용하여 측정하고, 각 조건에 따른 표면조도를 비교분석하는 실험을 수행하였다. 고품질의 가공을 위해 가공 조건을 다양하게

변경하였다. 일정한 위치에서의 표면조도를 측정하기 위해 Fig. 20의 C부분의 하이트게이지(height gauge)를 사용하여 측정부의 위치를 고정하고 측정하고자 하는 모델의 종류만 바꾸어 측정하였다. 여기에 사용된 실험장비는 미쓰토요(Mitutoyo Co., Ltd)의 표면조도 측정기(SJ-310)이며, A부분의 모니터에서 표면의 형상과 표면조도를 확인할 수 있다. B부분은 검출부이며 측정기의 사양에 따라 일정한 속도로 표면을 측정하게 된다. C부분은 하이트 게이지이고 검출부의 각도와 높이, 위치를 고정하기 위해 사용되었다.

6.2 실험결과 및 고찰

가공조건은 앞선 해석조건과 같은 조건으로 선정하였고, 그에 따른 결과를 다구찌 설계 분석을 통해 분석하였다. 실험결과들을 분석한 결과 Fig. 21에서 보듯이 해석결과와 동일하게 RPM의 값이 증가할수록 표면조도는 좋아지고, 절삭이송속도와 절입량 값이 감소할수록 표면조도 또한 좋아진다는 것을 알 수 있었다. 또한 S/N비와 평균에 대한 반응 표를 통해 해석에서의 결과와 동일하게 1순위의 주효과를 가지는 인자는 RPM인 것을 알 수 있다.

7. 결론

본 연구의 목적은 CAD/CAE/CAM시스템을 활용하여 Al6061에 대해 절삭력과 표면조도의 관계를 검증하는데 있다. 실험계획법을 통해 절삭력에 연관된 가공조건 중 RPM과 절삭이송속도, 절입량에 대하여 어떤 요인이 가장 큰 영향력을 나타내는지 파악하고, 이를 표면조도의 측정을 통해 검증하였다. DEFORMTM-3D를 이용한 해석 결과 RPM은 그 값이 증가할수록 절삭력이 감소하였고, 절삭이송속도와 절입량(step over)은 그 값이 감소할수록 절삭력이 감소하는 결과를 보였다. 또한 동일한 조건의 실제 가공을 통해 표면조도를 확인한 결과, RPM의 경우 그 값이 증가할수록 표면조도가 좋아졌고, 절삭이송속도와 절입량은 그 값이 감소할수록 표면 조도가 더 좋아지는 결과를 보였다. 한편 다구찌 기법을 통해 절삭력과 표면조도에 대한 RPM과 절삭이송속도, 절입량의 주효과를 확인한 결과 RPM이 가장 큰 영향력을 나타내었고, 다음은 절입량으로 나타났으며, 절삭이송속도는 상대적으로 가장 영향력이 작은 인자로 나타났다. 본 연구에서 제시한 유한요소해석 방법을 이용하면 절삭력 측정에 사용되는 시간과 비용을 크게 줄일 수 있으며, 연구결과는 금형형상 가공에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여

연구되었음.

References

- [1] Han, K. T., Park, J. H., 2021, Research on Effective Machining by CAD/CAE/CAM System, Proc. KSMPE Spring Conf. 2021., 181-182.
- [2] Han, K. T., Park, J. H., Gu, B. S., 2014, Research on Die Machining using 3D Printing and CAM System, Proc. Korean Soc. Mech. Eng. Spring Conf. 2014, 281-286.
- [3] Han, K. T., Park, J. H., Lee, V., Kim, J. H., 2013, A Study on Die Machining using CAD/CAM System (PowerSHAPE/MILL), Proc. Korean Soc. Mech. Eng. Spring Conf. 2013, 125-129.
- [4] Shaw, M. C., 1984, Metal Cutting Principles, Clarendon Press, Oxford, U.K.
- [5] Altintas, Y., Chan, P. K., 1992, In-Process Detection and Suppression of Chatter in Milling, Int. J. Mach. Tools Manuf., 32:3 329-347, [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(92\)90006-3](https://doi.org/10.1016/0890-6955(92)90006-3).
- [6] Minis, I., Yanushevsky, R., Tembo, A., Hocken, R., 1990, Analysis of Linear and Nonlinear Chatter in Milling, CIRP Ann-Manuf. Technol., 39:1 459-462, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61096-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61096-8).
- [7] Lee, S. Y., Im, Y. M., 2004, Prediction and Experiments of Cutting Forces in End Milling, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 13:4 9-15.
- [8] Choi, H. J., Choi, D. S., Jeon, E. C., Je, T. J., 2012, Relation of Cutting Force and Surface Roughness with Various Cutting Conditions in Ultra-fine End-milling, Proc. KSMPE Autumn Conf. 2012, 146.
- [9] Park, H. Y., Bae, M. W., Jung, H., Kang, M. S., 2010, Effect of Cooling Method on Surface Roughness in High-speed Machining, Proc. Korean Soc. Automot. Eng. Annual Conf. 2010, 2679-2684.
- [10] Kim, J. D., Yoon, M. C., 2014, An Analysis of Cutting Force according to Specific Force Coefficients, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 13:2 108-116, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.2.108>.
- [11] Jin, D. H., Kim, J. D., Yoon, M. C., 2013, Surface Roughness Model of End-milling Surface, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 12:2 68-74.
- [12] Jeon, E. C., Lee, S. Y., Lee, W. H., Kim, D. H., Chun, J. D., 2011, A Study on the Improvement of Productivity and Surface Roughness in Mold Machining using the Optimization of

Cutting Force, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 20:6 824-829.

- [13] Kim, C. Y., 2012, An Experimental Study of Al2017 on Characteristics of the Surface Roughness in Machining Center Processing, *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, 11:3 68-72.
- [14] Cho, J. H., Hwang, I. H., Park, S. H., Lee, J. C., 2013, Study on the Machining Characteristics of Cutting Inserts, *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, 12:3 76-80.
- [15] Yang, J. S., Jung, T. S., Kim, Y. G., 2006, Surface Texture and Roughness of Inclined Surface Milled by Long Neck Ball Endmill, *Proc. Korean Soc. Precis. Eng. Spring Conf. 2006*, 565-566.
- [16] Kim, D. H., Yoon, J. S., Lee, D. Y., 2019, Estimation of Tangential Cutting Force using Spindle Load of CNC Machining Center, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 28:6 343-349, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2019.28.6.343>.



Kyu Taek Han

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.
His research interest is Computer Aided Manufacturing.
E-mail: kthan@pknu.ac.kr