

Ti-6Al-4V 합금 항공기 부품 가공 시 발생하는 절삭추력 및 소성변형에 대한 해석

손휘준*, 김석*, 박기범**, 정현철***, 조영태*[#]

*창원대학교 스마트제조융합협동과정, **창원대학교 스마트제조기술센터, *** (주)티씨티

Analysis of Cutting Force and Plastic Deformation Occurring During Machining of Ti-6Al-4V Alloy Aircraft Parts

Hwi Jun Son*, Seok Kim*, Ki-Beom Park**, Hyoun Chul Jung***, Young Tae Cho*[#]

[#]Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University, **Smart Manufacturing Technology Center, Changwon National University, ***Turbo CAM Technology

(Received 02 June 2022; received in revised form 20 June 2022; accepted 24 June 2022)

ABSTRACT

Recently, investment in the aerospace industry has increased, and titanium alloys have been widely adopted for manufacturing parts in the aerospace industry. The Ti-6Al-4V alloy has high strength in high-temperature and high-pressure environments and is evaluated as a material with excellent heat, corrosion, and abrasion. However, titanium alloys are expensive, difficult to cut, and possess a large cutting load during the drilling process. In this study, the cutting force generated in the drilling process of Ti-6Al-4V alloy was verified via finite element analysis (FEM) and cutting force measurement experiments. A structural analysis was performed based on the cutting analysis data to verify the plastic deformation occurring during the drilling process of cylindrical Ti-6Al-4V alloy aircraft parts. Methods were proposed to predict the amount of deformation that occur during the manufacturing process of titanium-alloy aircraft parts and control the external environment, to minimize the amount of deformation.

Keywords : Ti-6Al-4V(Ti-6Al-4V 합금), Drilling(드릴링), Thrust Force(절삭추력), Aircraft Parts(항공기 부품), Plastic Deformation(소성변형)

1. 서 론

최근 산업의 고도화로 인해 항공·우주 산업에 대한 지속적인 투자가 증가하고 있으며 항공기 엔진, 터빈, 우주선 외관 등 항공 산업 부품의 제조공정

은 고부가가치 기술로 각광받고 있다.^{[1],[2]} 복잡한 형상과 높은 치수 정밀도를 요구하는 항공기 부품은 절삭가공을 통해 제작되며, 티타늄 합금이 주로 사용된다.^[3] 티타늄은 내열성, 내식성 및 내마모성이 우수하여 고온·고압의 환경에서 높은 강도를 가지며, 강과 비교하여 비중이 작고 탄성이 2배 이상 높기 때문에 우주항공 부품, 첨단무기, 터빈 부품 등에 많이 사용된다.^{[4],[5]}

[#] Corresponding Author : ytcho@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3600, Fax: +82-55-275-0101

하지만 티타늄 합금은 재료의 단가가 높고 열전도율이 다른 금속에 비해 낮기 때문에 절삭가공 시 공구날 부위에 절삭열이 집중되어 공구마모·파손이 쉽게 발생된다. 따라서 티타늄은 다른 금속과 비교하여 가공공정이 매우 까다로우며, 절삭가공 시 난삭재로 분류된다.^{[6],[7]} 또한 티타늄 합금의 높은 강성과 공구날의 열집중으로 인한 Edge부의 빠른 마모로 인해 가공 시 절삭부하가 높게 발생하기 때문에 가공 후 부품의 소성변형이 발생하게 된다.^[8] Table 1은 티타늄 합금 항공기 부품의 50% 이상을 차지하고 있으며, 대표적으로 사용되는 티타늄 소재인 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 특성을 나타낸다.

기존에 수행되었던 티타늄 가공 최적화 연구에 의하면 L자 형상 얇은 벽의 티타늄 합금 밀링 가공에서 가공품질 향상과 공구 수명 연장을 위해 가공조건을 변경하여 절삭력을 분석하였다.^[9] 또한 티타늄 합금의 가공변형에 대한 연구에 의하면 티타늄 드릴링 공정 시 발생하는 절삭부하를 절삭실험을 통해 확인하고 가공변형을 확인하였다.^[10]

본 연구에서는 Ti-6Al-4V합금의 드릴링 공정 시 발생하는 절삭추력을 유한요소해석과 절삭력 측정을 통해 파악하고, 드릴링 공정의 절삭추력으로 인해 발생하는 항공기 부품의 소성변형을 구조해석을 통해 확인하고자 한다.

2. 절삭력 측정

Ti-6Al-4V 합금의 드릴링 공정 시 발생하는 절삭력을 확인하기 위해 유한요소해석과 절삭력 측정실험을 진행하였으며 결과를 비교분석 하였다. 본 연구에서는 항공기 엔진 부품인 압축기 케이스를 CATIA 프로그램으로 유사하게 모델링하였다. Fig. 1과 같이 티타늄 합금 소재에 두께가 얇은 원통형 형상을 이루고 있으며 측면 홀에 다수의 드릴링

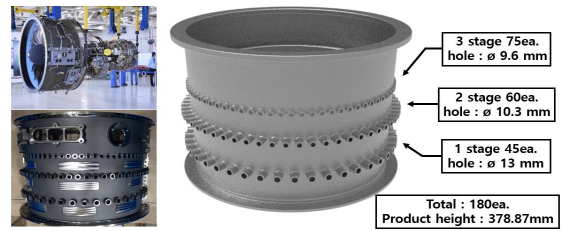


Fig. 1 Titanium alloy aircraft parts modeling

Table 2 Drilling cutting conditions

Stage	Feed rate (mm/min)	Spindle speed (rev/min)
1	220	1102
2	222.5	1391
3	223	1492

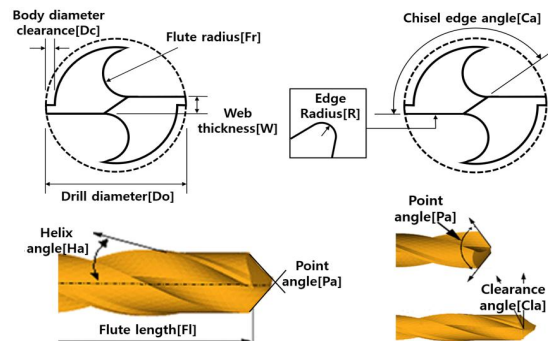


Fig. 2 Shape factors of drill

공정이 진행된다. 공구는 KORLOY 사의 MSDPH-S 드릴을 사용하였으며, Table 2는 드릴 가공조건을 나타낸다.

2.1 유한요소해석

해석적 방법으로 드릴링 공정의 절삭특성 확인하기 위해 Third wave systems 사의 절삭해석 전용 소프트웨어인 AdvantEdge FEM을 사용하였다. 해석에서 작성된 Element 간의 수치해석 기법이 적용되어 절삭특성을 확인할 수 있는 해석 소프트웨어로서 프로그램상의 공구형상, 절삭조건, 소재 파라미터를 실제 절삭 환경과 동일하게 적용하여 해석을 진행하였다.^[11] Fig. 2, Table 3은 실험 및 해석에 사용한 드릴의 치수별 형상인자 및 수준을 나타낸다.

Table 1 Ti-6Al-4V Mechanical properties

Mechanical properties	Value
Tensile strength_Ultimate (MPa)	1170
Tensile Strength_Yield (MPa)	1100
Elongation_Break (%)	10
Hardness (HRC)	41

Table 3 Shape factor dimension value of drill

Shape factor	Stage		
	1	2	3
Do	13	10.3	9.6
Dc	0.33	0.3	0.25
Ha	30	30	30
W	1.30	1.12	1.07
Fr	4.4	3.5	3.1
R	0.024	0.024	0.024
Pa	140	140	140
Cla	12	12	12
Ca	137	137	137

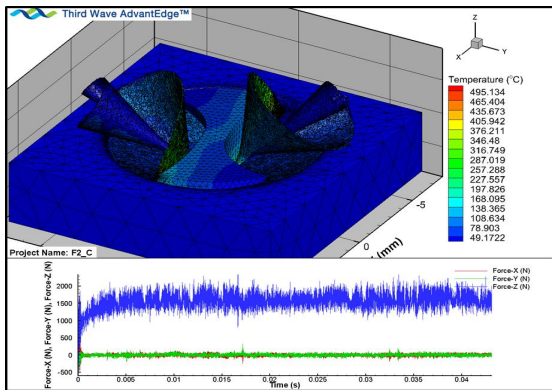


Fig. 3 AdvantEdge drilling 3D simulation

2날 공구인 드릴의 특성상 0.5회전마다 절삭력의 주기성을 가지며, 해석의 시간을 줄이기 위해 드릴의 1회전(360°) 해석을 진행하였다. 드릴의 날에 해당하는 Edge부는 절삭력에 직접적인 영향을 미치기 때문에 Edge radius의 1/3으로 Edge radius의 Mesh 크기를 0.008mm로 적용하였으며, 절삭이 이루어진 피삭재의 절삭면은 소성변형이 발생한 부위로서 Adaptive Re-meshing을 고수준으로 적용하여 해석의 정확도를 높였다. Fig. 3은 AdvantEdge의 3D Simulation Drilling을 통해 진행한 드릴 절삭해석 및 시간에 따른 절삭력 신호를 나타낸다.

2.2 절삭실험

해석을 통해 확인한 절삭력과 실제 절삭부하를

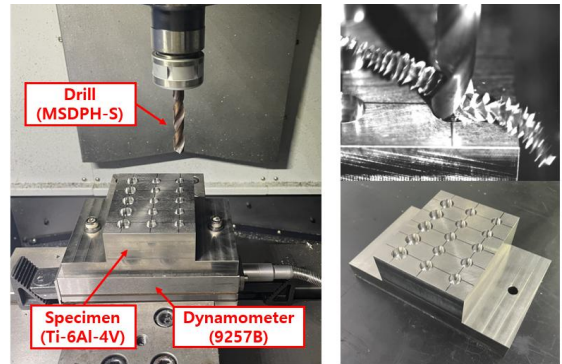


Fig. 4 Establishment of cutting experiment equipment

비교하고자 절삭실험을 진행하였다. 실험에 사용된 장비는 3축 가공장비인 DOOSAN-FANUC i Series를 사용하였으며, 드릴링 시 발생하는 절삭부하를 측정하기 위해 Kistler사의 공구동력계(Multicomponent dynamometer 9257B)를 사용하였다. 앞서 진행한 절삭해석의 경계조건과 동일한 절삭조건으로 드릴링을 진행하였고, 공구동력계에서 측정된 데이터를 전하증폭기와 A/D변환기를 통해 컴퓨터 내 전용 측정 소프트웨어로 절삭부하를 측정하였다. 드릴링 공정의 경우 드릴링 방향의 절삭부하가 절대적이므로 Z축(드릴링 방향)으로 발생하는 절삭추력(Thrust force)을 측정하였으며, X, Y방향으로 발생하는 절삭력은 비교값에서 제외하였다. 각 드릴마다 5회 드릴링을 진행하였으며, 건식가공으로 드릴링을 수행하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 공구동력계, 티타늄 시편, 드릴공구를 나타낸다.

2.3 절삭해석의 유효성 검증

해석결과와 절삭실험 측정결과를 비교분석하여 해석적 방법의 유효성을 검증하였다. 절삭실험은 미소시간에 드릴의 회전에 따라 절삭이 이루어지기 때문에 날 하나의 회전마다 발생하는 절삭력을 세분화하여 파악하기 어렵다. 따라서 해석에서 1회전 시 발생하는 균일한 절삭력 구간의 평균값을 드릴링 공정 시 발생하는 절삭력의 대표값으로 가정하고 절삭력을 비교하였다. 비교 결과 Fig. 5와 같이 각 절삭력의 오차율이 10% 이하이며, 해석적 방법을 통해 충분히 Ti-6Al-4V 합금의 드릴링 공정 시 발생하는 절삭력을 예측할 수 있음을 확인하였다.

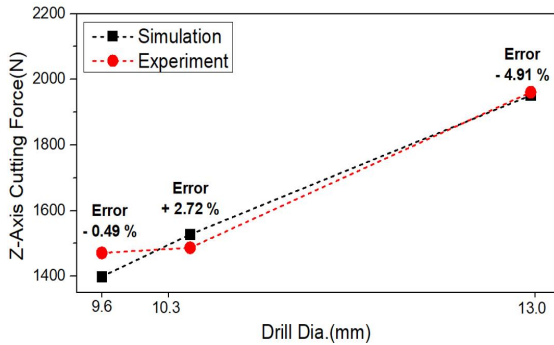


Fig. 5 Validity of Ti-6Al-4V Drilling Analysis

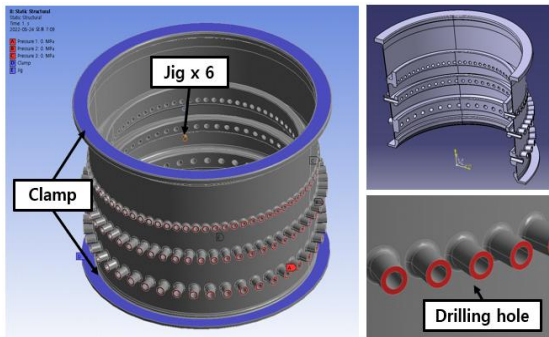


Fig. 6 Simulation boundary conditions and fixation

3. 소성변형해석

3.1 해석방법

해석 모델링의 Meshing size를 1mm로 적용하여 16×10^6 개의 Node와 96×10^5 개의 Element를 작성하였다. 압축기 케이스의 상하단부 Clamp와 내부 지그는 고정조건으로 가정하여 Fixed 조건을 적용하였다. 드릴링 시 절삭추력에 의해 발생하는 변형을 방지하고자 압축기 케이스 내부 Stage 2와 3 사이에 6개의 Jig arm이 60° 간격으로 고정되어 있으며, 접촉부의 Contact 조건을 Bonded로 적용하여 완전 고정이라 가정하였다. 총 180개의 드릴링 홀에 절삭해석을 통해 확인한 절삭추력 값을 적용하였다. Fig. 6은 변형해석의 경계조건 및 고정조건을 나타낸다.

드릴링 공정이 진행되는 동안 티타늄 합금에 전도되는 절삭열을 적용하기 위해 Heatflux조건을 적

Table 4 Heatflux by Ti-6Al-4V alloy drilling

	Stage		
	1	2	3
Force (N)	1951.17	1527.23	1398.66
Heat flux (W/m ² ·K)	0.95	0.772	0.814

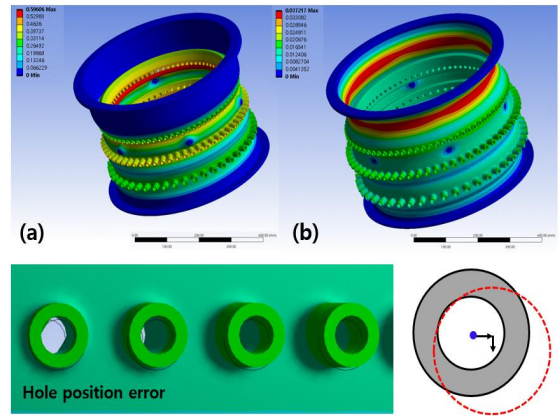


Fig. 7 Position error of hole by position

용하였다. 해석에 적용한 Meshing size와 동일하게 1mm 단위로 전도되는 절삭열을 푸리에 열전도식을 사용하여 열플럭스값으로 계산하였다. Ti-6Al-4V 합금의 열전도도 7.2W/m·K를 적용하였으며, 압축기 케이스 드릴링 홀 내부 측면에 적용하였다. 드릴링이 진행되는 동안 절삭유와 냉각작용을 고려하여 26°C에 열전달계수 0.01W/mm²·K의 대류조건을 적용하였다. Table 4는 hole의 절삭부에 적용된 절삭추력, 절삭열 수준을 나타낸다.

3.2 해석결과

항공기 압축기 케이스의 드릴링 공정이 완료되었을 때 외력이 제거되는 것을 감안하여 해석 종료 시 힘과 열조건을 0으로 적용하여 최종적으로 발생한 소성변형량을 측정하였다. 측정 결과 외력에 의한 경계조건이 제거되었음에도 드릴링 공정 시 발생한 절삭추력, 절삭열로 인한 소성변형이 발생하였으며, 그로 인한 측면 홀의 위치도 오차가 발생하였다.

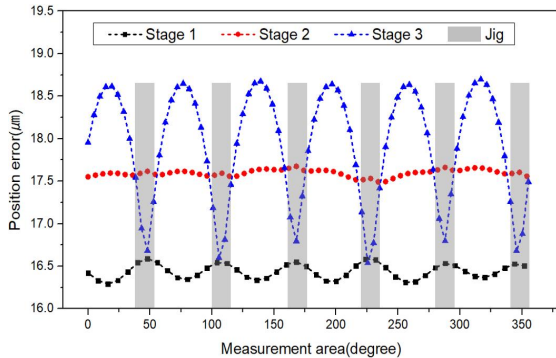


Fig. 8 Position error of hole by position

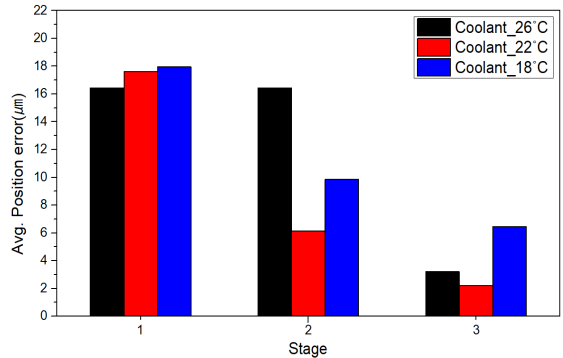


Fig. 9 Position error by cooling temperature

Table 5 Average position error of holes

	Stage		
	1	2	3
Average position error (μm)	16.4	17.6	17.9

Fig. 7, 8은 해석이 완료된 모델링의 변형형상과 원통형상 360°에서 각 Stage의 홀에 대한 위치도 오차를 나타낸다. Stage 3에 위치한 홀의 경우 내부 지그의 고정에 영향을 받으며 고정부에 가까울수록 적은 오차가 발생하지만, Stage 1, 2의 홀은 내부 지그에 영향을 받지 않고 일정한 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Table 5는 각 Stage에 대한 평균변형량을 나타낸다.

3.3 절삭유 온도개선

Ti-6Al-4V 합금은 절삭가공 시 고온의 절삭열이 발생하며 이는 금속의 기계적 강성을 저하시키고 열변형을 일으킨다. 따라서 Ti-6Al-4V 합금의 드릴링 공정 시 발생하는 절삭열을 감소시켜 홀 위치도 오차를 개선시키고자, 해석에 적용된 절삭유 냉각에 따른 경계조건의 온도를 변경하였다. 절삭유의 온도를 18, 22, 26°C 적용하여 동일한 조건에 해석을 진행하였으며, 해석결과 모든 홀 위치도에 대해서 냉각효율을 증가시킬 때 위치도 오차가 감소하며, Stage 2에서 최대 14.8 μm 의 오차가 감소하는 것을 확인하였다. Fig. 9는 각 Stage의 절삭유 온도에 따른 변형량을 나타낸다.

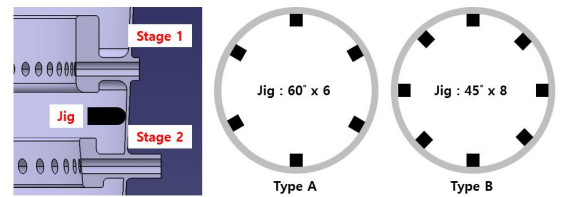


Fig. 10 Schematic diagram of jig improvement

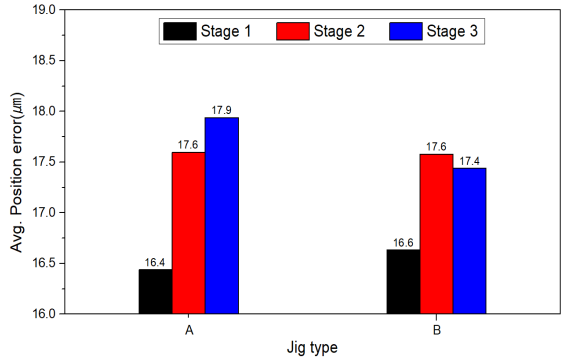


Fig. 11 Position error due to jig improvement

3.4 내부 지그개선

드릴링 공정 시 내부 지그를 개선시켜 홀 오차도를 줄이고자 Fig. 10과 같이 Stage 2, 3사이에 고정되어 있는 6개의 Jig arm을 8개로 모델링하여 해석을 진행하였다. Stage 1, 2의 경우 지그 고정부에 따른 홀 오차도의 영향이 적은 것으로 확인되어 지그를 추가하지 않았다. 해석 결과 Fig. 11과 같이 Stage 3에서 0.5 μm 의 홀 오차가 감소하며, Stage 1, 2의 경우 개선 효과가 없는 것으로 판단된다. 이는

Ti-6Al-4V 합금의 기계적 물성상 절삭력보다 절삭열에 의한 변형 영향도가 큰 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 티타늄 소재의 항공기 부품의 드릴링 공정 시 발생하는 변형량을 해석적 방법을 통해 확인하였다. AdvantEdge 드릴링 해석을 통해 확인한 드릴의 절삭추력, 절삭열을 ANSYS Workbench 열구조해석에 적용하여 압축기 케이스의 홀 가공공정 시 발생하는 가공변형량을 확인하고, 해석을 통해 변형량을 최소화할 수 있는 방안을 제시하였다.

드릴링 절삭해석과 실험값의 비교를 통해 해석결과와 실험값의 유효성을 검증할 수 있으며, Ti-6Al-4V 합금 항공기 압축기 케이스의 측면홀 드릴링 공정 시 절삭추력으로 인해 최대 17.9 μ m의 홀 위치도 오차가 발생한다. 절삭유를 18 $^{\circ}$ C로 제어 시 최대 14.8 μ m의 가공변형으로 인한 홀 위치도 오차를 줄일 수 있으며, 공구 인선부에 집중되는 절삭열을 줄여 공구수명을 연장시킬 수 있다. 내부지그의 개선을 통한 홀 위치도 오차의 개선 효과는 크지 않으며, 절삭유를 통한 효율적인 냉각환경이 홀 위치도 오차 개선에 효과적이다. 본 연구를 통해 티타늄 합금 절삭가공의 가공변형을 예측하고 공정최적화를 통해 가공품질을 개선할 수 있다.

후 기

“이 논문은 2020년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임.” (P0015893, 항공기 엔진용 고압압축기 케이스의 성능개선)

“이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.” (No. NRF-2019R1A5A8083201)

REFERENCES

1. Lee, S. H., “A Study on the Productivity Improvement of Aircraft Parts Using AdvantEdge PM,” A Thesis for a Masterate, Changwon National

University, Republic of Korea, 2017.

2. Brewer, W. D., Bird, R. K., & Wallace, T. A., “Titanium alloys and processing for high speed aircraft,” *Material Science and Engineering*, Vol. 243, No. 1-2, pp. 299-304, 1998.

3. Kim, G. H., “A Study on Characteristics of Cutting by Cutting Conditions in Titanium Machining,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 12, No. 1, pp. 84-89, 2013.

4. Kim, N. Y., Hong, W. P., Lee, D. J., “A Study on the Cutting Characteristics and Analysis by a FEM in the Machining of Ti-6Al-4V alloy,” *Transactions of the Korean Society of machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 6, 2001.

5. Pujana, Joseba, Rivero-Rastrero, Asun, Celaya, Ainhoa, López de Lacalle, Luis Norberto, “Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V,” *Interational J. of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 49, No. 6, pp. 500-508, 2009.

6. Lee, J. H., Kim, H. Y., Yoon, H. S., “Sustainability Analysis in Titanium Alloy Machining,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 12, pp. 73-81, 2019.

7. Kim, D. H., Park, K. B., Cho, Y. T., Jung, Y. G., “A Study on Improved Drill Shape for Efficient Drilling of Inconel 718 Using the Design of Experiment,” *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 34, No. 3, pp. 161-166, 2017.

8. Kim, D. H., Jung, Y. G., Mo, Y. S., Cho, Y. T., “Cutting Characteristics and Deformation Analysis for Chord and Side Fitting Parts in an Aircraft Bulkhead,” *Journal of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 29, No. 1, pp. 74-81, 2020.

9. Kim, J. M., Koo, J. Y., Jun, C. S., “Improving Machining Quality of L-Shaped Thin-Walled Structure in Milling Process of Ti-Alloy (Ti 6Al 4V),” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 20, No. 11, pp. 52-59, 2021.

10. Park, K. B., Cho, Y. T., Jung, Y. G., “Study on Deformation Analysis of Holes during Drilling of

Aircraft Engine Compressor Cases,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 3, pp. 65-70, 2018.

11. Kim, D. H., Jung, Y. G., Cho, Y. T., “Study on the Selection of End Mill Shape to Improve Tool Life in End Mill Process of Ti-6Al-4V Alloy,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 11, pp. 76-82, 2019.