

# 절삭력 제어 프로그램을 이용한 Inconel718 소재의 생산성 향상에 관한 연구

이승헌\*, 손황진\*, 조영태\*, 정윤교\*.<sup>#</sup>

\*창원대학교 기계공학부

## A Study on the Productivity Improvement of Inconel 718 Material Using Cutting Force Control Program

Seung-Heon Lee\*, Hwang-Jin Son\*, Young-Tae Cho\*, Yoon-Gyo Jung\*.<sup>#</sup>

\*School of Mechanical Engineering, Changwon UNIV.

(Received 13 August 2017; received in revised form 11 October 2017; accepted 7 November 2017)

### ABSTRACT

Productivity improvement and cost reduction in the aircraft industry have become major industrial objectives, and improving productivity by reducing machining time has become a key focus. When numerical cutting code is created by CAM software, such as CATIA or UG-NX, it is impossible to control machining feed speed using cutting force changes depending on the machining tool path. However, machining an aircraft engine part from difficult material, such as Inconel 718, takes a long time, and tool chipping or breakage often occurs from forcing the machining path too quickly.

This study investigated and verified the reliability of the AdvantEdge production module (PM) using cutting power tests. In particular, diffuser and diffuser case parts were considered, comparing cutting power and machining time using AdvantEdge PM and CATIA.

**Key Words** : Tangential Force(주분력), Tool Path(공구경로), Cutting Conditions(절삭조건), Advantedge Production Module(절삭력제어프로그램), Monitoring(동력측정장치)

## 1. 서 론

항공 산업의 발전과 수요 증가로 인하여 생산성 향상 및 원가절감이 산업체의 주요 목표로 대두되고 있고, 공작기계 공업의 발달로 인해 단품을 가공하여 용접하는 방식에서 공작기계에서 완성품의 형상을 가공하는 방식으로 변화하고 있다. 그로

인해 가공 공정에서의 가공시간이 증가하고 있어, 가공시간 단축을 통해 생산성을 향상하는 연구가 진행되고 있다.<sup>[1-2]</sup> 항공기 엔진 부품은 고정밀도를 기본으로 고신뢰도, 고강도, 우수한 내열성, 내부식성과 내마모성 등의 특성을 요구하는 난삭재를 주로 사용한다. 난삭재 중에서도 인코넬 합금(Inconel Alloy)은 Ni를 주종으로 하여 Cr, Fe, Mn, Si 등을 첨가한 내열합금이다. 그중에서도 Inconel718은 -250℃의 저온에서부터 700℃의 고온까지 높은 강도를 유지하는 시효경화합금

# Corresponding Author : ygjung@chanwon.co.kr

Tel: +82-55-213-3602, Fax: +82-55-213-2859

(Age-hardening Alloy)으로 시효상태에서 용접할 수 있으며 980°C까지 내산화성이 우수하다. 화학적으로도 안정하여 부식에 강하며, 인성과 크리프강도가 높고 우수하여 균열이 잘 발생하지 않는다. 이런 장점으로 인해 최첨단 산업인 항공우주산업의 엔진 부품 소재로 Inconel과 같은 금속이 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 금속의 장점은 기계가공을 어렵게 하는 주요한 인자가 된다.<sup>[3-4]</sup> Inconel718의 경도는 일반 난삭재에 비해 크지 않으나, Fe 함량이 적고 Ni과 Cr의 함량을 증가시켜 인성이 크고 고온강도가 큰 특성이 있어 공구의 파손을 방지하기 위해 낮은 절삭속도로 가공하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Software가 발달하기 전에는 기하학적 수식을 이용하여 절삭력을 예측하는 방법이 많이 연구 되었으나<sup>[5-7]</sup> Software의 발달로 인해 가공 시뮬레이션을 이용하여 공구가 시간당 제거하는 소재의 부피를 이용한 소재 제거율을 고려하여 이송률 제어를 통해 가공시간 단축에 관한 연구가 진행되었다. 하지만 소재의 물성이 고려되지 않아 난삭재를 사용하는 항공기 엔진 부품에는 적합하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 Inconel718 소재의 항공기 엔진 부품을 대상으로 물성 라이브러리가 내재되어있는 Advantedge pm을 이용하여 Advantedge pm에서 예측한 절삭력을 조절하여 Feed control에 의해 생성된 NC code를 통해 가공시간을 단축해 생산성을 향상하는 것을 목적으로 연구를 수행하였다.

## 2. Software의 신뢰성 검증

### 2.1 검증 방법

본 연구에 앞서 Advantedge pm의 신뢰성 검증을 위하여 기초실험을 진행하였다. Advantedge pm은 물리량을 근거로 한 모델링으로 가공 시뮬레이션을 통해 절삭력과 공구의 걸리는 힘, 온도, 동력, 가공 시간을 분석하여 Feed control 된 NC code로 변환하여 생산성을 향상하는 Software이다. Advantedge pm의 신뢰성을 확보하기 위하여 Inconel718 소재인 Aircraft engine case에 대하여 Advantedge pm과 절삭 가공에서 발생하는 Spindle

power 값을 측정하여 상호 비교하였다. 절삭상태를 가장 정확하게 나타내어주는 것은 절삭력이지만, 절삭력 측정에 사용되는 공구동력계는 가공물의 크기와 형상의 제약으로 인해 본 실험에서는 Monitoring 장치를 이용하였다. Monitoring 장치란 스피들과 각 축 모터에 센서를 부착하여 실제 가공할 때의 마력을 측정하는 장치이다. CATIA를 이용하여 Milling tool path와 NC code를 생성하였고, Mitsui-seiki의 5축 가공기(HU63A-5X)를 사용하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 공구는 YG-1의 SEME011203E Endmill을 사용하였으며, 실험 장비는 Fig. 1에 나타내었고, 공구형상과 절삭 조건은 Table 1을 따라 실시하였다.

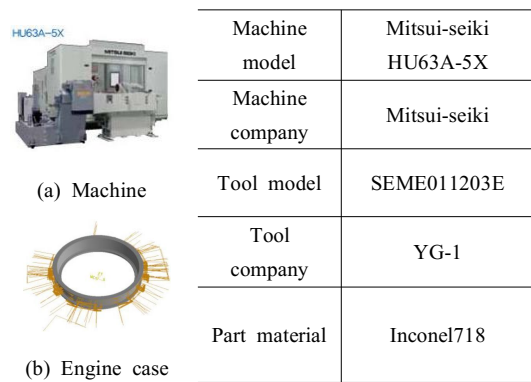


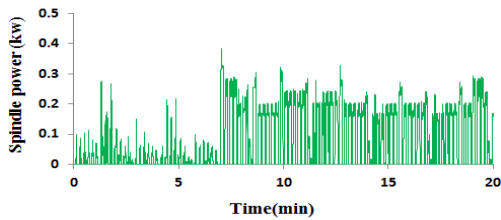
Fig. 1 Experimental equipment

Table 1 Endmill shapes and cutting conditions

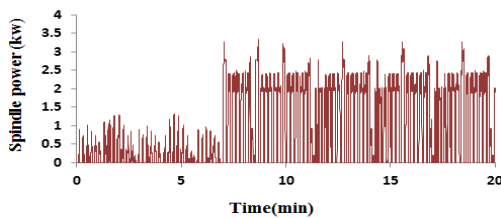
Shape names	Size	Cutting conditions	
Diameter (mm)	12	Cutting speed (m/min)	40
Number of flutes (ea)	4	RPM(m/rev)	1061
Radial rake angle (deg)	3	Feed per tooth (mm/rev)	0.03
Helix angle (deg)	28.5	Feed rate(mm/min)	127.3
Relief angle(deg)	10	Tooth (ea)	4
Corner-radius(mm)	3	Axial depth(mm)	2
Overall-length(mm)	110	Radial depth(mm)	6
Length of cut (mm)	30	Machining time (min)	25

## 2.2 검증 결과

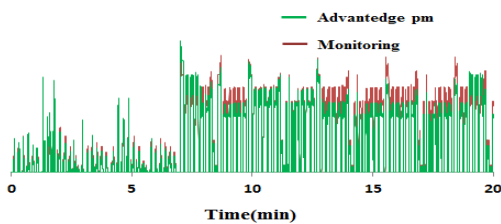
Milling tool path를 20분씩 6개의 공구로 총 120분간 절삭을 하였다. Fig. 2는 20분간 절삭한 Milling tool path에 대하여 Spindle power 값을 분석한 그림이며, Fig. 2(a)와 (b)의 Spindle power 값은 약 10배 정도의 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 그 원인으로 Advantedge pm은 절삭 시 공구의 날 끝에 걸리는 절삭력을 해석하여 Spindle power 값으로 도출하지만, Monitoring은 Spindle 전체를 고려하여 Spindle power 값이 측정되는 것으로 사료된다. Fig. 2(c)는 Spindle power 값을 고려하지 않고 패턴만을 비교한 결과인데, 80% 이상 일치하는 형태의 패턴을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Advantedge pm



(b) Monitoring



(c) Comparison of spindle power pattern

Fig. 2 Analysis of spindle power

## 3. Advantedge pm을 이용한 NC code 생성

### 3.1 시뮬레이션 과정

CATIA를 이용하여 Modeling 및 NC code를 작성하고 Vericut을 이용하여 검증하였다. 먼저, 기존 방식인 CATIA만을 이용하여 NC code를 생성한 것과 Advantedge pm을 이용하여 가공 별 Tool path의 절삭력을 조절하여 Feed control에 의해 생성된 NC code에 대하여 절삭력과 가공시간을 비교하였다. Fig. 3은 시뮬레이션 과정을 나타내고 있다.

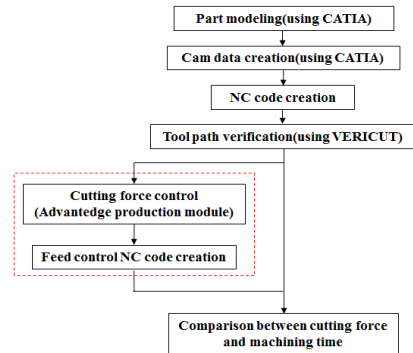


Fig. 3 Simulation process

### 3.2 3D modeling 및 NC code 생성

항공기 엔진 부품의 Diffuser case와 Diffuser를 대상으로 Modeling 하였다. Diffuser case와 Diffuser는 엔진의 특징에 따라서 다양한 형상이 있으나, 전통적인 형상을 선택하였다. 항공기 엔진의 Diffuser case는 다른 Case류에 비해 Inconel718 소재를 사용하며, Casting 제품으로 필요한 형상만 가공하는 것이 아니라 전체 형상을 가공하기 때문에 가공시간이 길고, 공구의 파손이 빈번하여 Diffuser case와 Diffuser를 대상으로 연구를 진행하였다. CATIA를 이용하여 Table 1의 공구 형상과 절삭 조건을 따라 Tool path를 생성하여 NC code를 출력하였다. CATIA를 이용하여 생성한 NC code를 Advantedge pm에 삽입하여 시뮬레이션한 뒤 가공 별 Tool path의 절삭력을 분석하였다. 그런

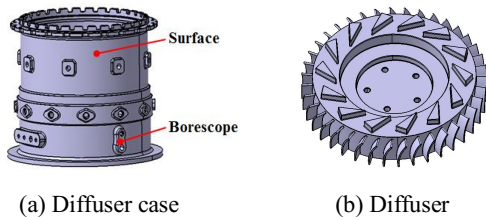


Fig. 4 Experimental shapes

다음 절삭조건에 맞는 Tangential force를 기준으로 Feed control이 된 NC code를 생성하고, CATIA를 이용하여 생성한 NC code와 Advantedge pm을 이용하여 생성한 NC code에 대하여 절삭력과 가공시간을 비교하였다.

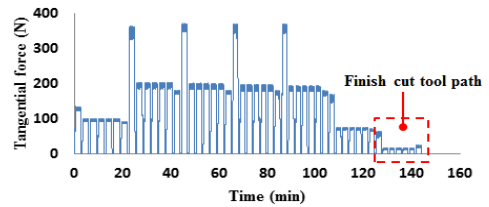
## 4. 실험 결과

### 4.1 절삭력 비교

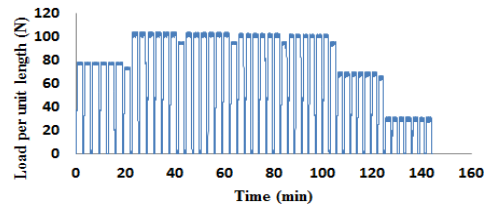
Fig. 5는 Fig. 4(a)의 Surface 형상 가공에 대하여 CATIA에서 생성한 NC code의 Tangential force와 Advantedge pm을 이용하여 Feed control에 의해 생성된 NC code의 Tangential force를 비교한 그림이다. Fig. 5(a)의 Table 1의 절삭 조건을 적용한 Tangential force의 해석 결과는 200N이었고, Fig. 5(b)의 Tangential force가 200N일 때의 Load per unit length는 105N이었으며, 가공시간은 146분이었다. Load per unit length는 절삭력을 절삭 깊이로 나눈 값을 말하며, Advantedge pm에서는 공구의 하중으로 해석된다.

Tangential force만을 고려하여 Tangential force 200N을 기준으로 제어하였더니, Fig. 5(c)와 같은 결과를 얻을 수 있었고, 가공시간은 146분에서 104분으로 28.76% 단축되었다.

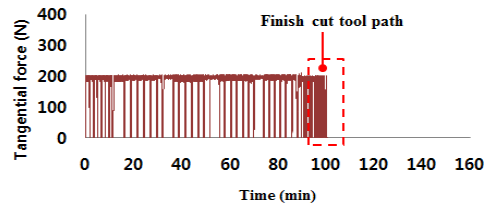
Fig. 6은 Fig. 5(a)의 Tangential force가 34N인 Finish cut tool path를 Fig. 5(c)의 Advantedge pm을 이용하여 Tangential force를 200N으로 제어한 것에 대한 NC code를 분석한 그림이다. Tangential force 34N을 200N으로 제어함에 따라 Fig. 6에서 보는바와 같이 F184.67이 F6932.42까지 빨라지는 것을 알 수 있다.



(a)Tangential force of CATIA NC code



(b) Load per unit length of CATIA NC code



(c)Tangential force of Advantedge pm NC code

Fig. 5 Analysis between tangential force and load per unit length

Feed		Feed	
G01 X-24.688 Y31.615	F184.67	G01 X-24.688 Y31.615	F1693.92
X-25.785 Y30.73		X-25.785 Y30.73	F1682.91
X-26.844 Y29.807		X-26.844 Y29.807	F1682.96
X-27.873 Y28.847		X-27.873 Y28.847	F1683.03
X28.868 Y27.851		X28.868 Y27.851	F1694.48
X-32.48 Y23.539		X-32.48 Y23.539	F2962.47
X-33.286 Y22.385		X-33.286 Y22.385	F6932.42

(a)CATIA NC code

(b)Advantedge pm NC code

Fig. 6 Analysis of NC code

위 결과로 Feed control이 되는 것은 확인할 수 있지만, 절삭이 아닌 충돌 수준의 Feed가 생성되어 절삭 시에 공구의 파손이 발생할 것으로 예측할 수 있었다. 따라서 Advantedge pm은 Tangential force만을 고려하여 제어하는 것이 아니라 공구의

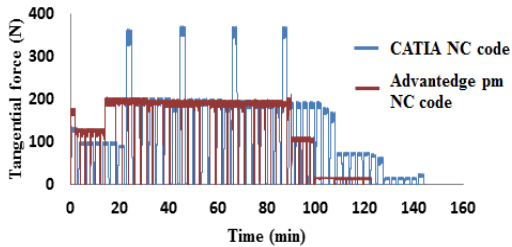
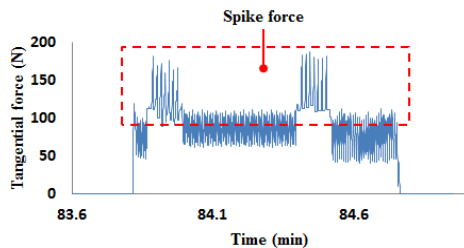
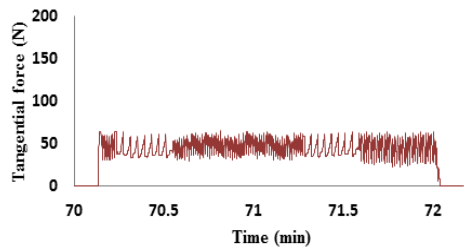


Fig. 7 Comparison of tangential force



(a) Zoomed by CATIA NC code



(b) Zoomed by Advantedge pm NC code

Fig. 8 Tangential force of finish cut tool pa

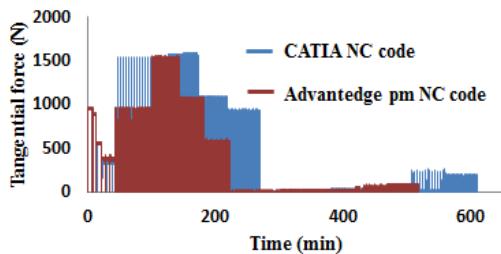


Fig. 9 Comparison of tangential force

하중인 Load per unit length도 함께 고려하여야 한다고 판단하여 조건을 변경하여 다시 진행하였다.

Tangential force 200N과 공구의 하중 105N으로 동시에 제어하도록 설정하여 Tangential force를 조절 하였더니, Fig. 5(c)와 같이 일률적으로 Tangential force가 200N으로 상승하는 것이 아니라 공구의 하중 제어 값인 105N을 고려하여 Tangential force가 조절되는 것을 Fig. 7에서 확인할 수 있었다. 가공시간은 Tangential force만을 고려하였을 때 보다 18분 증가한 122분이었지만 가공 안정성은 확보되어 효율적인 가공이 될 것으로 예측하였다.

Fig. 8은 Fig. 4(b)의 Borescope 형상에 대하여 Finish cut tool path의 Tangential force를 분석한 그림이다. Fig. 8(a)는 Spike force가 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, Spike force는 공구의 치핑과 파손을 일으키는 주원인이며, 표면 거칠기와 형상 정밀도의 악영향을 야기시킨다. 이를 Advantedge pm을 이용하여 Tangential force를 제어하였더니, Fig. 8(b)와 같이 Spike force가 제거되는 것을 확인할 수 있었고, 이를 통해 정상 가공에서 중요한 표면 거칠기와 형상 정밀도가 좋아질 것으로 판단할 수 있었다.

Fig. 9는 Diffuser에 대하여 Diffuser case와 같이 Tangential force와 공구의 하중을 함께 제어하여 CATIA NC code의 Tangential force와 Advantedge pm을 이용하여 Feed control 된 NC code의 Tangential force를 비교한 그림이다.

## 4.2 NC code의 분석

Fig. 10은 Diffuser case에 대하여 CATIA에서 생성한 NC code와 Advantedge pm을 이용하여 Feed control 된 NC code를 비교 분석한 그림이다. Fig. 10(a)의 NC code를 보면 C 지점부터 D 지점까지 F60으로 가공하는 것을 확인할 수 있는데, Advantedge pm을 이용하여 생성한 NC code는 Fig. 10(b)와 같이 C 지점부터 D 지점까지 가공하는 동안 조절된 Tangential force에 따라 좌표가 분리되고, 각각의 Feed가 생성되어 가공시간이 단축되는 것을 확인할 수 있었다. 그리하여 Diffuser case의 가공시간은 83.1시간에서 69.4시간으로 16.5% 단축되었고, Diffuser의 가공시간은 10.2시간에서 8.6시간으로 15.2% 단축되었다.

<p>C- G90 G00 X-22.979 Y87. A0 B-116.718 G43 Z146.071 H02 Z46.071</p> <p>D- G01 X-3.001 Z47. F60 B-114.738 F127.32 B-112.759 B-110.78 B-108.801 B-95.936 B-93.957 B-91.978</p>	<p>Feed control →</p>	<p>G90 G00 X-22.979 Y87. A0 B-116.718 - C G43 Z146.071 H02 Z46.071</p> <p>G01 X-19.929 Z46.213 F84 X-18.912 Z46.26 F160.55 X-17.896 Z46.307 F172.94 X-16.879 Z46.335 F154.13 X-15.862 Z46.402 F129.95 X-8.745 Z46.733 F75.07 X-7.728 Z46.78 F74.19 X-3.001 Z47. F73.16 - D</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

(a) CATIA NC code (b) Advantedge pm NC code  
**Fig. 10 Analysis of NC code**

## 5. 결 론

본 논문은 석사 학위 논문을 편집하였으며,<sup>[8]</sup> Aircraft engine의 조립 되는 Diffuser case와 Diffuser의 Inconel718 재질을 대상으로 Advantedge pm을 이용하여 가공시간 단축을 통해 생산성 향상을 목표로 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. AdvnatEdge pm의 신뢰성을 검증하였고, Inconel718 소재에 대하여 가공 시간 단축을 통해 생산성을 향상할 수 있었다.
2. Advantedge pm을 이용하여 Diffuser case의 가공 시간을 83.1hours에서 69.4hours로 16.5%, Diffuser는 10.2hr에서 8.6hours로 15.2% 단축하는 결과를 얻을 수 있었다.
3. Advantedge pm을 이용하여 Tangential force를 제어하면 표면 거칠기와 치수정밀도에 악영향을 주는 Spike force가 제거되는 것을 확인할 수 있었다.

## 후 기

“이 논문은 창원대학교 산학협력단 5X-CAM 지역혁신센터 사업으로 수행되었음.”

## REFERENCES

1. Lee, U. M., Kim, N. K. and Kim, H. J., “A Study on the High Speed Machining of Major Structure in Aircraft,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 1, pp. 119-124, 2012.
2. 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.
3. Kim, D. H., Park, K. B., Cho, Y. T. and Jung, Y. G., “A Study on Improved Drill Shape for Efficient Drilling of Inconel 718 Using the Design of Experiment,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 34, No. 3, pp. 161-166, 2017.
4. Park, J. M., Choi, W. S., Kwon, S. H. and Cha, J. H., “Optimal Cutting Conditions of Surface Roughness for Inconel 718 Alloy in Turning Operation,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 4, pp. 48-53, 2009.
5. Kline, W. A., Devor, R. E. and Lindberg, J. R., “The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts,” International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 22, No. 1 pp. 7-22, 1982.
6. Kline, W. A. and Devor, R. E., “The Effect of Run Out on Cutting Geometry and Forces in End Milling,” International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 23, No. 2/3, pp. 123-140. 1983.
7. Jung, S. C. and Kim, K. W., “Prediction of Cutting Forces in High Speed End Milling,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 4, No. 4, pp. 21-27, 2015.
8. Lee, S. H., “A Study on the Productivity Improvement of Aircraft Parts Using AdvantEdge PM,” Graduate School of Industry, Changwon National University, Master's degree paper, 2017.