

# 티타늄합금 단조 형상의 5축 가공 특성에 관한 연구

정홍일\*, 공정리\*\*, 김해지\*\*\*,#

\*경상국립대학교 자동차공학과 대학원, \*\*한국폴리텍대학 로봇캠퍼스 로봇기계과,

\*\*\*경상국립대학교 자동차공학과

## Five-axis Machining Characteristics of Titanium Alloy Forging Shape

Hong-Il Jung\*, Jeong-Ri Kong\*\*, Hae-Ji Kim\*\*\*,#

\*Department of Automotive Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University,

\*\*Department of Robotics Machinery, Robot campus of Korea Polytechnic,

\*\*\*Department of Automotive Engineering, Gyeongsang National University

(Received 11 December 2021; received in revised form 3 January 2022; accepted 5 January 2022)

### ABSTRACT

Owing to the excellent corrosion resistance of titanium alloys, they are widely used as materials for aircraft components. However, in terms of machining, dimensional deformation methods vary significantly, such as forging, owing to their difficult-to-cut property and the uncontrollable vibration generated during machining. A method to minimize the vibration generated during machining by applying advanced tools and controlling the sequence of machining processes, which can improve the machinability and precision of titanium alloy-forged low-angle components, is proposed herein. Using the proposed tool and based on a process order experiment, the efficiency of the machining process is verified by measuring the dimensional deformation of the low-angle component.

**Keywords** : Titanium Alloy(티타늄 합금), Machining Process Improvement(가공 공정 개선), 5-axis Shape Machining(5축 형상가공), Carbide Endmill(초경 엔드밀), HSS Endmill(HSS 엔드밀)

### 1. 서 론

티타늄합금은 강도, 피로저항성, 내식성, 경량화 등을 고려하면 항공기 소재로서 최적의 물성을 갖

춘 금속 소재로 알려져 있다.

최근 항공기 부품의 제작에 복합재료의 사용량이 증가함에 따라 내부식성이 우수한 티타늄합금의 사용량이 증가하고 있다. 티타늄합금 부품의 제작 시에 제작 단가를 감소시키기 위해 3D 프린팅과 같은 적층가공(additive manufacturing)을 기반으로 하는 연구와 산업 적용이 시도되고 있으나, 제품의

# Corresponding Author : khji@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-3647, Fax: +82-55-772-3649

형상정밀도와 소재의 무결점 확보가 중요한 산업에서는 여전히 밀링, 터닝, 드릴링 등과 같은 절삭가공 방법에 의해 부품이 제작되고 있다.<sup>[1-5]</sup> 알루미늄 합금이나 금형재료 등의 소재는 절삭속도와 가공효율이 큰 폭으로 향상된 것에 비해, 티타늄합금 소재는 재질의 특성상 가공 방법이 크게 발전하지 못한 실정이다. 이는 높은 화학적 반응과 낮은 열전도율을 가짐으로써, 저속의 절삭속도로 인해 공구 수명을 단축시켜 생산성 향상이나 가공비용 절감 측면에서 많은 문제가 되는 난삭재이다. 특히, 티타늄합금 단조 형상은 형상적인 특성으로 인해 기계가공시 발생하는 절삭진동에 의한 피삭재의 떨림에 취약하여 이를 억제할 수 있는 소재의 구속력과 고정방법이 매우 중요하다.<sup>[4,6]</sup>

따라서 본 논문 연구에서는 절삭가공이 난해하고 두께가 얇고 긴 티타늄합금 단조 형상의 로우앵글 부품에 대한 5축 가공 특성을 실험하였다. 로우앵글 단조 형상의 5축 가공 시에 발생하는 절삭부하를 견딜 수 있는 안정적 체결력을 가진 치공구를 제작하여, 기계가공 시 발생하는 공정별 가공변형량을 측정하고 가공변형의 요인에 대한 분석을 고찰하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 모델 선정

항공기 전방동체 착륙장치를 구성하는 조립체 중에 티타늄합금 단조로 제작된 원소재를 기계 가공하는 부품인 로우앵글 부품을 연구 모델로 결정하였다. 로우앵글 부품은 얇고 긴 형상을 가지고 있으며, 정밀공차를 만족해야 하는 가공이 난해한 제품이다. 제품의 형상적인 특성으로 인해 가공 후 나타나는 잔류응력 및 절삭열에 의한 제품 변형을 억제하여 도면에서 요구되는 평면도 및 가공변형을 최소화하여 가공하여야 한다.

로우앵글 부품은 LH(left hand), RH(right hand) 두 제품으로 구성되며, 본 논문에서는 LH 형상을 선정하여 실험하였다. Fig. 1에서는 CATIA 프로그램을 이용하여 디자인된 로우앵글 부품의 LH 3차원 형상을 나타내고 있다.

### 2.2 티타늄합금 소재

본 연구의 5축 가공에 적용한 로우앵글 티타늄합금 단조 형상의 주요 치수를 Fig. 2에 나타내었으며, Fig. 3에서 보는 바와 같이 티타늄합금 단조 3D 모델의 공차를 만족하고, 단조과정에서 발생하는 수축과 변형을 최소화하여 Fig. 4와 같이 티타늄합금 소재로 로우앵글 부품의 단조 형상을 제작하였다.

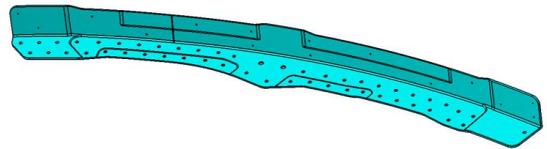


Fig. 1 Test model of lower angle

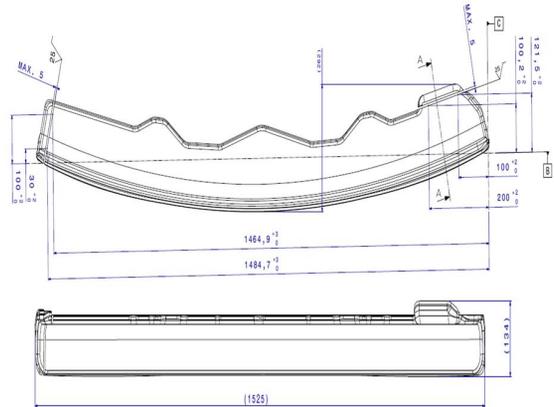


Fig. 2 Dimensions of titanium alloy forging

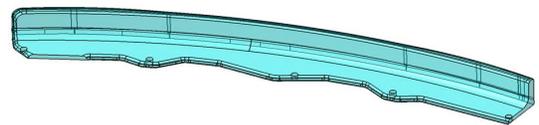


Fig. 3 3D model of titanium alloy forging



Fig. 4 Shape of forging material

### 2.3 실험장치

티타늄합금 단조 형상의 가공 특성 절삭실험을 위하여 황삭가공과 정삭가공으로 구분하여 5축 장비를 사용하였다. Table 1과 Fig. 5에서는 황삭가공에 사용된 장비 CINCINNATI 20V-80의 사양과 사진을 나타내고 있으며, Table 2와 Fig. 6에서는 정삭가공에 사용된 장비 DMG-210P의 사양과 사진을 나타내고 있다.

**Table 1 Specification of CINCINNATI 20V-80 machine**

Machine type	5-axis machine
Machine maker	CINCINNATI MILACRON
Work spindle	Power : 15 kW Speed range : 20 ~ 3,600 rpm
Machine size	3,300(W) × 6,000(L) × 3,300(T)
Travel	Longitudinal(X-axis) : 2,135 mm Transverse(Y-axis) : 760 mm Vertical(Z-axis) : 610 mm Spindle tilt(A-axis) : +25/-25 degree Spindle swivel(B-axis) : +25/-25 degree
Controller	Acromatic 950



**Fig. 5 5-axis machine of CINCINNATI 20V-80**

**Table 2 Specification of DMG-210P machine**

Machine type	5-axis machine
Machine maker	DECKEL MAHO
Work spindle	Power : 52 kW Speed range : 0 ~ 12,000 rpm
Machine size	8,800(W) × 6,300(L) × 4,900(T)
Travel	Longitudinal(X-axis) : 1,800 mm Transverse(Y-axis) : 2,100 mm Vertical(Z-axis) : 1,250 mm Spindle tilt(A-axis) : +10/-120 degree Spindle swivel(B-axis) : 360 degree
Controller	Siemens 840D



**Fig. 6 5-axis machine of DMG-210P**

### 2.4 치공구 및 적용 공구

로우앵글 부품은 기존에 판재 형태의 소재로 먼저 제작되었으나, 소재 절감과 가공 시간 단축을 위하여 판재 형태에서 단조품 소재로 변경된 제품이다. 로우앵글 부품을 가공하기 위해서는 황삭 가공용 치공구와 바로퍼기 작업을 위한 면삭 가공용 치공구, 중삭 및 정삭 치공구, 그리고 외곽 및 홀 가공을 위한 치구 등 여러 종류의 치구가 사용된다. Fig. 7에서는 모든 공정에 공통적으로 사용되는 치공구 Master plate의 3D 모델과 제작된 실제 모습을 나타내고 있다. Fig. 8에서는 제품의 최종 외곽 정삭 및 플랜지 홀 가공을 하는 정삭용 치공구의 3D 모델과 제작된 사진을 나타내고 있다.

티타늄합금 소재는 열전도율이 철이나 스테인리스강 보다 현저히 낮고 활성재료의 특성을 가지고 있어, 가공 중에 절삭점이 고온으로 상승하면 산소와 질소가 화학반응을 하기 쉬운 절삭날의 결손, 융착, 박리, 확산마모 등을 일으킨다.<sup>[7-10]</sup>

Fig. 9에서는 일반적으로 티타늄합금 소재의 가공에 적용되는 초경 솔리드 공구(carbide solid cutter, 대구택), 초경 인서트 공구(carbide insert cutter, 한국 OSG) 및 고속도공구강(HSS) 절삭공구의 사진을 나타내고 있다. 특히, 초경 재종의 절삭공구는 고온에서 우수한 내열성을 발휘함으로써 열전도율이 낮은 티타늄합금 소재의 가공 시 절삭에 의해 발생하는 열이 공구의 절삭점에 집중되어도 공구수명을 보장할 수 있다. 황삭가공에 주로 사용되는 큰 직경의 공구는 초경 인서트 공구를 사용하거나 고속도공구강을 사용하여 공구비 부담을 최소화하였다.

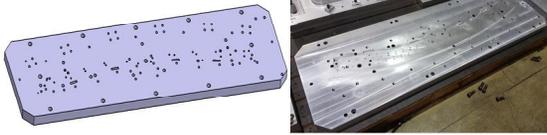


Fig. 7 Master plate jig

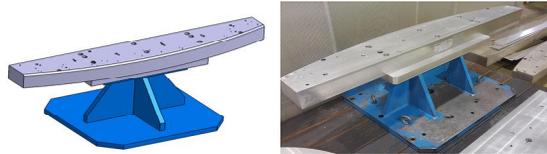


Fig. 8 Finish cutting jig



(a) (b) (c)

Fig. 9 Cutting tools for titanium machining

Table 3 Process conditions of cutting tool

Tool type	Rpm (m/min)		Feedrate (mm/min)		Ap (mm)	Ae (mm)
	Min	Max	Min	Max		
Rough E/M	220	264	45	54	40	5
Drill	650	780	65	78	2	4
Drill	290	348	45	54	16	19.1
Insert cutter	92	110	45	54	2	40
Face mill	200	240	200	240	0.2	155
Drill	650	780	62	74.4	2	2.5
Drill	620	744	52	62.4	8.5	6.35
Chamfer E/M	750	900	75	90	2	7.5
Rough E/M	220	264	45	54	40	2
Flat E/M	420	504	75	90	40	1
Fillet E/M	380	456	65	78	3	1
Insert cutter	430	516	95	114	3	50
Flat E/M	440	528	60	72	5	2
Flat E/M	440	528	60	72	10	1
Drill	600	720	60	72	2	2.5
Drill	600	720	35	42	5.5	3.3
Drill	580	696	35	45	5.5	4.2
Drill	580	696	35	45	5.5	4

## 2.5 절삭조건

티타늄합금 소재의 안정된 절삭가공을 위하여 항공기 부품의 난삭재 가공에서 검증된 저속 절삭가공조건을 적용하여 가공하고자 하였다. 본 실험에서는 로우앵글 부품의 전체 가공공정에서 사용할 절삭공구에 대한 표준화된 절삭조건(이송속도, 주축회전수, 절입량)을 도출하고자 하였다. 이를 위해 각 공정에서 사용되는 절삭공구의 실험가공으로 절삭공구별 최적화된 평균 절삭조건과 최대 절삭조건을 산출하였으며, 절삭공구의 축방향 절입량(Ap) 및 폭방향 절입량(Ae)에 대한 표준값을 제시할 수 있었다. 로우앵글 부품의 가공에서 절삭공구 적용은 황삭가공에서 주로 사용되는 Roughing endmill, Insert cutter와 정삭가공에서 사용되는 HSS endmill, Carbide endmill로 구분하여 재질과 가공량에 따라 다르게 적용하였으며, 홀 가공을 위한 드릴은 공구의 직경별로 구분하여 적용하였다. Table 3에서는 실험가공에 적용된 절삭공구의 절삭조건을 나타낸 것이다.

## 2.6 NC 데이터 생성

로우앵글 부품의 가공을 위한 NC 데이터를 생성하기 위해서 CATIA V5의 Machining 기능을 이용하여 NC 프로그램을 작성하였다. 가공 공정별로 황삭가공과 정삭가공을 구분하여 공구경로를 생성하였다. Fig. 10과 Fig. 11에서는 CATIA V5를 이용하여 생성된 엔드밀, 인서트 커터, 드릴 가공 등의 공구경로와 가공 시물레이션을 나타낸 것이다.

## 2.7 실험방법

공정의 설계 시 앵글 형상이 가지는 구조적 가공변형과 티타늄합금 소재의 난삭성을 고려한 방법으로 가공이 이루어져야 하므로, 로우앵글 부품 가공을 위해 가공 효율 및 장비 부하를 분산하기 위해 황삭가공과 정삭가공에 적용되는 장비를 2개로 분류하였다. 가공시 발생하는 가공변형을 최소화하여 부품가공의 최적화를 위한 목적으로 가공 공정별 변형을 고려하여 진행하였다. Fig. 12에서는 최초가공 공정으로 설계된 공정에 대하여 설명한 것이며, Fig. 13에서는 실제 적용된 공정 사진을 나타내고 있다.

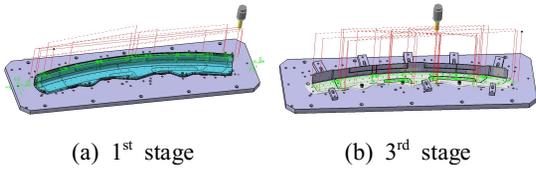


Fig. 10 Creation tool path of process

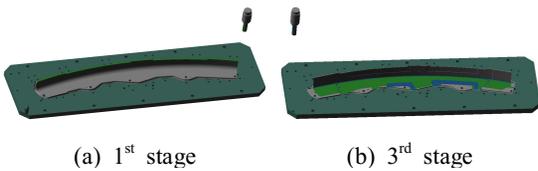


Fig. 11 Machining simulation of process

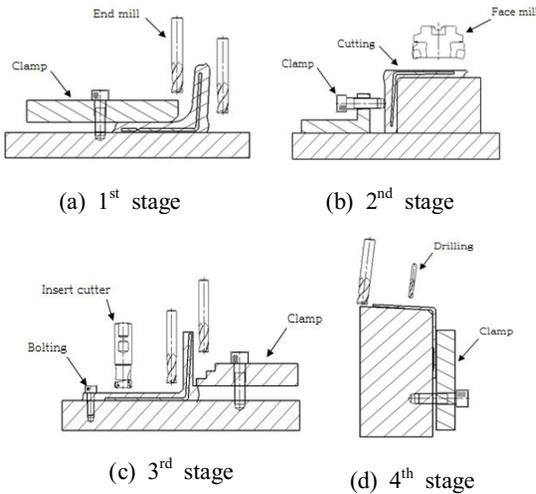


Fig. 12 Machining process before improvement

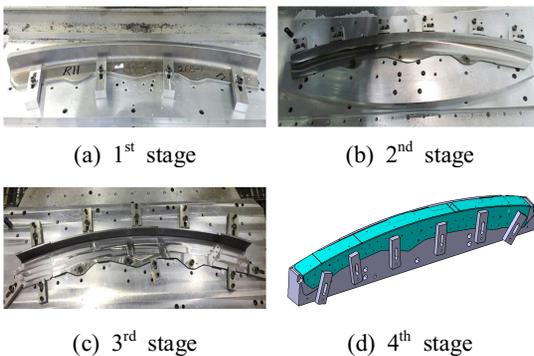


Fig. 13 NC machining before improvement

### 3. 실험결과 및 고찰

5축 머시닝센터를 사용한 티타늄합금 단조 형상의 절삭과 변형을 최소화 하는 가공공정 개발을 위하여 황삭, 중삭, 정삭 등으로 구분하여 단조 소재의 가공 시 발생하는 가공변형을 최소화하는 공정으로 진행하였다. 장비부하를 분산하기 위해 황삭 가공과 정삭가공의 공정별 가공 집중도를 낮추어 생산에 안정적으로 적용될 수 있도록 실험하였다.

#### 3.1 가공 공정 및 장비의 분류

가공공정은 황삭가공과 정삭가공으로 구분하였으며, 공정의 분류는 1<sup>st</sup> stage, 2<sup>nd</sup> stage, 3<sup>rd</sup> stage, 4<sup>th</sup> stage 등의 4단계 공정으로 분류하였다. 1<sup>st</sup> stage 공정은 황삭, 2<sup>nd</sup> stage 공정은 변형제거공정(바로 펴기), 3<sup>rd</sup> stage 공정은 정삭가공, 4<sup>th</sup> stage 공정은 Flange hole 가공 및 완료가공 공정이다. 가공장비의 분류는 직경이 큰 절삭공구를 사용하여 중절삭가공을 주로 하는 황삭가공의 경우 장비의 주축 및 기계적 강성이 우수한 CINCINNATI 20V-80 장비를 사용하여 1<sup>st</sup> stage 공정과 2<sup>nd</sup> stage 공정을 진행하였으며, 장비의 정밀도를 요구하는 정삭가공의 경우 DMG-210P 장비를 사용하여 3<sup>rd</sup> stage 공정과 4<sup>th</sup> stage 공정을 진행하였다.

#### 3.2 치공구 적용

로우앵글 부품의 안정된 가공을 위하여 가공 공정별로 전용 치공구를 제작하여 가공에 적용하였다. Milling fixture의 치공구는 모든 공정에 적용되는 Master plate, Index block, Flange hole 가공용 치공구 등을 적용하여 절삭가공 실험을 수행하였다.

#### 3.3 실험 가공 프로세스

1<sup>st</sup> stage 공정은 공용 치공구를 사용하여 황삭가공하는 공정이다. 최초 단조품을 치공구에 셋업할 때, NC 프로그램상의 기준위치와 동일하게 위치시키기 위해 단조품 외곽에 기준이 되는 Index pin을 삽입하여 단조품 외곽을 밀어붙이는 방식으로 소재의 위치를 결정한다. 단조품의 고정방법은 클램프를 사용하여 고정하며, 단조품의 외형이 균일하지 않음을 고려하여 가공을 시작할 때 소재의 위치를

확인하는 공구경로를 적용하여 위치 확인 후에 형상가공을 진행하였다. 황삭가공에서는 전체 형상에 부품치수 5.00mm 여유를 주고 가공 완료하였다. Fig. 13(a)는 1<sup>st</sup> stage 공정의 가공 전 클램프가 설치된 사진이며, Fig. 13(b)는 2<sup>nd</sup> stage 공정의 가공 전 클램프 적용 사진이며, 1<sup>st</sup> stage 공정에서 발생하는 가공변형을 제거하기 위해 Index block을 이용하여 소재에 가해지는 힘을 최소로 하여 가공하는 공정이다. 3<sup>rd</sup> stage 공정은 Flange 외곽 및 홀을 제외한 전체 정삭가공이며, Fig. 13(c)는 3<sup>rd</sup> stage 공정 가공 전의 클램프가 적용된 사진이다. Fig. 13(d)는 4<sup>th</sup> stage 공정 가공 전의 클램프가 적용된 CATIA V5 3D 형상이며, Flange 외곽 및 홀을 가공하는 공정으로 제품을 완성하였다.

### 3.4 가공변형을 고려한 실험

제품 가공 중에 발생하는 가공변형으로 도면에 요구하는 제품의 평면도를 만족하지 못하는 결과가 나타났으며, 가공변형을 줄이기 위한 가공공정의 개선이 필요하였다. 로우앵글 부품의 가공변형의 유형은 앵글 형상의 내측면 모서리부분에서 변형이 발생되어 전체 형상이 뒤틀려 버리는 휨 변형의 형태를 나타내었다. 또한 최종 가공된 제품의 앞쪽

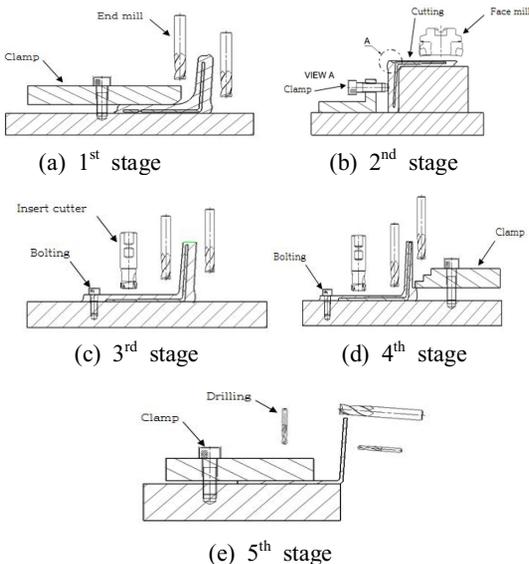


Fig. 14 Machining process after improvement

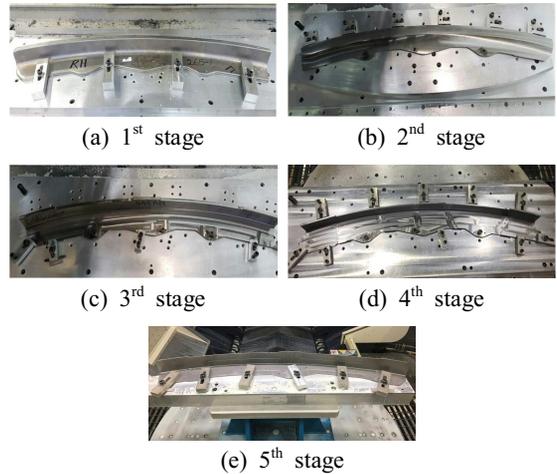


Fig. 15 NC machining after improvement

기준면이 CMM(coordinate measurement machine) 검사 시에 기준이 되는 Datum 부분의 평면도 공차를 만족하지 못하였다.

로우앵글 부품의 가공에서 가공변형에 영향을 준 것으로 보이는 부분은 황삭 후 정삭에서 오는 가공량의 문제와 단조 형상에서 오는 가공변형의 집중 현상을 해소하는 공정이 필요하다고 판단하였으며, 판재 형태와는 다른 단조 소재로써 가공 중의 소재 속에 발생하는 응력의 풀림과 변화가 일반적인 소재와는 다르게 발생할 것이다. 이러한 부분이 고려된 가공 공정 및 가공 방법이 필요한 것으로 판단하여 기존 가공 분류를 황삭-정삭에서 중삭을 추가한, 황삭-중삭-정삭으로 분류하였으며, 가공 공정의 순서를 기존 4가지 공정에서 5가지 공정으로 세분화하였다.

Fig. 15(a)는 황삭공정인 1<sup>st</sup> stage 공정을 나타내었으며, Fig. 15(b)는 변형제거공정인 2<sup>nd</sup> stage 공정을 나타내었다. Fig. 15(c)는 가공변형을 고려해서 추가된 중삭공정인 3<sup>rd</sup> stage 공정을 나타내었으며, Fig. 15(d)와 Fig. 15(e)는 정삭가공 및 Flange hole 가공인 4<sup>th</sup> stage와 5<sup>th</sup> stage 공정을 나타내고 있다.

적용 장비의 분류는 CINCINNATI 20V-80 장비에서 1<sup>st</sup> stage, 2<sup>nd</sup> stage, 3<sup>rd</sup> stage 공정을 진행하였고, DMG-210P 장비에서 4<sup>th</sup> stage, 5<sup>th</sup> stage 공정을 진행하였다. 세부적인 변경사항을 살펴보면, 1<sup>st</sup> stage 공정에서는 절삭조건이나 방법의 변동없이 기존과

동일한 조건으로 가공하였다. 2<sup>nd</sup> stage 공정에서는 변형 제거공정을 수행함과 동시에 단조 형상의 인쪽끝 단부에 집중되는 가공부하를 최소화하기 위해, 모따기 형상 부분을 황삭하는 공구경로를 추가하여 형상적으로 오는 가공 부하 및 응력의 집중을 해소하는 방향으로 가공 방법을 변경하였다. 그리고 추가된 3<sup>rd</sup> stage 공정에서는 이후 정삭공정(4<sup>th</sup> stage 공정)에서 가공되는 절삭량을 최소화하기 위해 2.0mm를 먼저 제거하는 중삭공정을 추가하여 변형량을 최소화하고자 하였다. 4<sup>th</sup> stage 공정에서 최종 형상에 대한 정삭공정을 수행하여 평면도 치수를 만족하는 결과를 만들어 내었다. 5<sup>th</sup> stage 공정에서는 4<sup>th</sup> stage 공정까지 가공 후에 개선되지 않는 변형을 인위적으로 개선하기 위한 샷 피닝 공정을 고려한 개선이 이루어졌다.

### 3.5 공정 최적화

공정변경 및 치공구 개선을 통해 품질요구조건에 만족하는 가공변형량의 개선 및 품질결과를 도출하였다. 초기공정으로 가공된 제품에서는 Fig. 16의 1~9번까지 제품의 왼쪽 하단부와 중간 부분이 들리는 형태와 뒤틀리는 형태를 보였다. 그러나 개선된 공정 및 가공 방법 개선으로 왼쪽 하단부의 가공변형량이 최대 0.5mm 개선되었으며, 제품의 중간부분에서는 0.6mm 이상 개선되는 결과를 보였다.

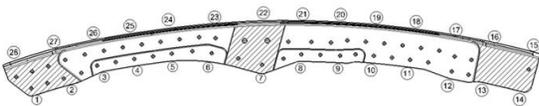


Fig. 16 Flatness requirement : 0.5mm

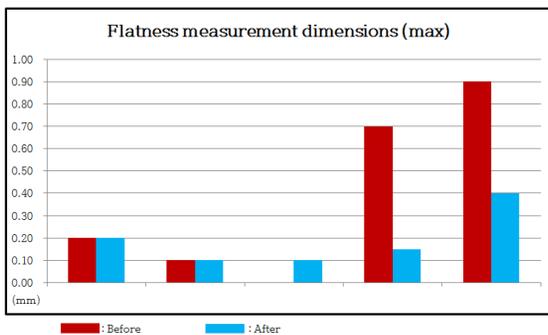


Fig. 17 Comparison of flatness by process

제품의 6~8번 부분은 제품의 평면도 공차를 만족 하는데, 치수적으로 중요한 역할을 하는 부위로 이 부분의 평면도 개선이 부품의 정밀도에 큰 영향을 미친다. Fig. 17에서는 기존 공정과 개선된 공정을 비교한 것으로 개선된 공정으로 인한 안정된 평면도 수치를 나타낸 것이다.

## 4. 결론

본 논문 연구에서는 티타늄합금 단조 형상의 로우앵글 부품을 5축 기계 가공 시에 절삭저항과 가공 응력으로 인해 발생하는 부품의 가공변형을 최소화할 수 있는 효율적인 가공공정에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 복잡한 형상을 가진 티타늄합금 단조 형상의 가공변형 최소화를 위해 치공구와 클램프 고정방법을 고려하여 가공에 적용해야 한다.
2. 가공변형이 일어날 수 있는 부품 형상에 대한 변형 발생요인 형상부위를 최종 정삭가공 전에 먼저 제거하는 방법을 적용하여 가공변형을 최소화하였다.
3. 가공변형이 많이 발생하는 부품은 공정을 세분화하고, 공정별로 가공량을 분산시켜 가공함으로써 가공변형을 최소화할 수 있다.
4. 티타늄합금 단조 형상의 로우앵글 부품의 효율적인 가공공정 적용을 통하여 치수 요구조건인 평면도 0.5mm를 만족하였다.

## REFERENCES

1. Ezugwu, E., "Key Improvements in the Machining of Difficult-to-Cut Aerospace Superalloys," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 12-13, pp. 1353-1367, 2005.
2. M'Saoubi, R., Axinte, D., Soo, S. L., Nobel, C., Attia, H., and et al., "High Performance Cutting of Advanced Aerospace Alloys and Composite Materials," *CIRP Annals*, Vol. 64, No. 2, pp. 557-580, 2015.

3. Ezugwu, E. and Wang, Z., "Titanium Alloys and their Machinability—A Review," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 68, No. 3, pp. 262-274, 1997.
4. Han, S. W. and Kim, H. J., "Experimental Study on Shape Machining Characteristics of Composite Honeycomb Core," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 13, No. 4, pp. 28-35, 2014.
5. Lee, I. S. and Kim, H. J., "A Study on High Speed Machining Distortion Characteristics of Aluminum Lithium Alloys Wing Rib," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 13, No. 6, pp. 111-118, 2014.
6. Ashwin, P., Manikanda, S., Moshe, G. and Guy, L., "Cutting Force and Surface Finish Analysis of Machining Additive Manufactured Titanium Alloy Ti-6Al-4V," *Procedia Manufacturing*, Vol 7, pp. 284-289, 2017.
7. Castellanos, S. D., Jorge, L. A. and Rui, J. N., "A Comparative Study of Manufacturing Processes of Complex Surface Parts in Titanium Ti6Al4V," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, Vol. 29, Issue. 2, pp. 73-78, 2017.
8. Roman, K., Jozef, P., Daniel, V., Juraj, M. and Marek, S., "Identification of Tool Wear Intensity During Miniature Machining of Austenitic Steels and Titanium," *Procedia Engineering*, Vol. 192, pp. 410-415, 2017.
9. Emmanuel, O. E., Rosemar, B. D. S., Wisley, F. S. and Alisson, R. M., "Overview of the Machining of Titanium Alloys," *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, pp. 487-506, 2017.
10. Oliver, H., Pete, C. and Martin, J., "On the Mechanism of Tool Crater Wear during Titanium Alloy Machining," *Wear*, Vol. 374-375, pp. 15-20, 2017.