

선삭가공시 Ti-6Al-4V 합금의 절삭특성에 관한 연구

박종남[#], 조규재*, 이승철**

A Study on the Cutting Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy in Turning Operation

Jong-Nam Park[#], Gyu-Jae Cho*, Seung-Chul Lee**

ABSTRACT

The titanium has many superior characteristics such as specific strength, heat resistance, corrosion resistance, organism compatibility, non-magnetic and etc. and their quantity are abundant. This study performed turning operation of Ti-6Al-4V alloy using the TiAlN coated tool which was treated with PVD. Experimental works were also executed to measure cutting force, chip figuration and surface roughness for different cutting conditions. As a result of study, tool wear was serious at the condition over 100m/min of cutting speed. The excellent cutting condition of cutting depth was at 1.0mm.

Key Words : Physical Vapor Deposition(PVD ; 물리증착), Corrosion Resistance(내식성), Specific Strength(비강도), Heat Resistance(내열성), Chip Figuration(칩 형태)

1. 서 론

티타늄 합금은 강(steel)에 비해 상대적으로 가벼운 무게를 가지고 있으며, 비중이 강의 60%정도 밖에 되지 않지만 티타늄으로 만들어진 제품의 강도는 강보다 강하고, 탄성은 강의 2배나 되며, 우수한 열에 대한 저항력 등 독특한 특성으로 인해 항공기, 방위 산업 부품, 엔진, 터빈, 자동차부품 및 일반 상업용품

에 이르기까지 사용범위가 점점 확대되어지고 있다^[1-3]. 그러나 대체로 낮은 열전도도와 높은 활성에 기인하기 때문에 기계가공 중에 발생한 열이 제품이나 장비 테이블을 통해 발산되지 않고 가공부위에 집중되는 현상이 발생하여 공구의 마멸 촉진과 가공정밀도를 얻지 못하는 문제점 등을 갖고 있어 난삭재로 분류된다.

난삭재인 티타늄합금에 관련한 연구동향을 살펴보면, Zlatin^[4]등이 티타늄합금의 기계적 성질과 가공성에 대하여 연구하였으며, Komanduri^[5]는 티타늄 합금의 가공에 있어서 칩 형성 과정 메커니즘에 대하여 연구하였고, Mcquillan^[6]등은 티타늄 합금의 선삭, 연삭, 드릴링 등 기계가공에 있어서 공구의 절삭성능에

교신저자 : 조선대학교 대학원 기계공학과
E-mail : end7115@ampal.com

* 조선대학교 기계공학과

** 조선대학교 대학원 기계공학과

대하여 각각 연구를 수행하였다.

Elgomayel^[7]는 Ti를 화학 증착법(CVD)로 초경 공구에 코팅하여 티타늄 합금 가공에 있어 코팅공구의 절삭특성에 관련한 연구가 수행되어져 왔으나 국내에서의 티타늄 합금 가공에 관한 연구는 홍우표^[8]의 시뮬레이션을 통한 티타늄 합금의 절삭력 및 온도예측에 관한 연구 등이 있으나 많지 않은 실정이다.

따라서, 티타늄 재료 시장의 절반 이상을 점유하고 있는 Ti-6Al-4V합금이 국내 산업의 전반에서 더욱 더 확대되려면 기계가공에 관련한 절삭특성을 정량적으로 규명하는 것이 최우선의 과제라 사료되어 본 연구에서는 PVD코팅 기술을 적용한 TiAlN코팅 공구를 사용하여, Ti-6Al-4V합금의 절삭력과 표면조도를 측정하고 절삭과정에서 배출된 칩의 형태를 관찰하여 칩 처리성을 분석, 고찰 하였다.

2. 실험장치

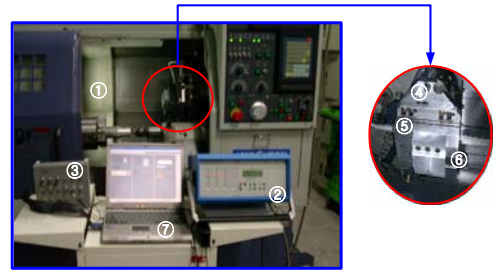
2.1 장치 구성도

본 연구의 절삭실험은 CNC선반(Hwa Cheon Hi-ECO 10E)을 사용하였으며, 실험장치 각 요소에 대한 제원과 실험에 사용된 실험장치의 사진을 Table 1과 Photo. 1에 각각 나타내었다.

절삭력측정은 압전식 공구동력계(Kistler, 9257b)를 사용하여 측정하였고, 공구동력계로 부터 미세한 전압을 안정적으로 증폭하기 위하여 Charge Amplifier (5019b)를 사용하였다. 가공면의 거칠기 측정은 촉침식 조도 측정기(Kosaka, DSF-1000)를 이용하여 측정하였고, 절삭가공에서 배출된 칩 형상은 산업용현미경(Sometech, *i* Camscope)을 사용하여 측정하였다.

Table 1 Experimental conditions

| Items | Type |
|------------------|-------------------------------|
| Lathe | HWACHEON Hi-ECO 10E |
| Tool dynamometer | Kistler 9257b |
| Amplifier | Kistler 5019b |
| A/D Converter | National Instrument DAQ-6224Q |



- ① Lathe ② Multichannel Charge Amplifier
- ③ A/D Converter ④ Jig ⑤ Tool Dynamometer
- ⑥ Tool holder ⑦ Notebook computer

Photo. 1 Experimental set-up

2.2 시험편 및 절삭공구

본 실험에 사용한 재료는 Ti-6Al-4V 티타늄 합금으로 시험편의 화학적 성분 및 기계적 성질을 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었으며, 실험에 사용한 절삭공구는 PVD방식을 적용한 TiAlN 코팅공구로 마름모형이며, 폐기형의 CNMG 120408이고 여유각은 0°이다. 칩 브레이크는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 3차원형식의 딤플형 칩 포머(dimple type chip former)가 형성되어 있는 중 절삭용 인서트 팁이다.

Table 2 Chemical compositions of Ti-6Al-4V

| Elements | Ti | Al | V | Fe | O ₂ | C | N ₂ | H | Y |
|----------|-------|-----|------|-----|----------------|-------|----------------|-------|-------|
| wt(%) | 89.13 | 6.2 | 4.19 | 0.2 | 0.17 | 0.027 | 0.023 | 0.016 | 0.001 |

Table 3 Mechanical properties of Ti-6Al-4V

| Direction | UTS (MPa) | YS (MPa) | EL (%) | Ra | H _{RC} |
|--------------|-----------|----------|--------|------|-----------------|
| Longitudinal | 1012.19 | 935.65 | 20.8 | 42.3 | 36 |
| Transverse | 997.71 | 927.38 | 21.7 | 46.4 | |

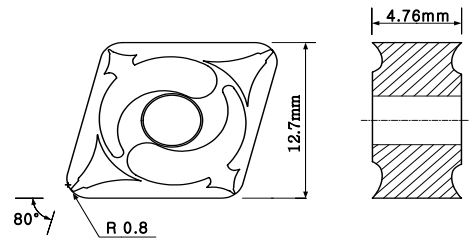


Fig. 1 Dimple type chip former

2.3 실험조건 및 실험방법

절삭실험의 가공순서는 절삭속도 30~110m/min으로, 각 각의 절삭깊이 0.5~2.5mm으로 고정시키고 이송속도를 0.1~0.3mm/rev으로 작은 것로부터 큰 쪽으로 변화를 주어 CNC 프로그램을 작성하여 절삭실험을 하였으며, 실험에 적용한 절삭조건을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Cutting conditions

| Process parameter | Condition |
|-----------------------|-------------------------------------|
| Cutting speed (m/min) | 30, 40, 50, 60, 70, 80 90, 100, 110 |
| Feed rate (mm/rev) | 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 |
| Depth of cut (mm) | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 |
| Nose radius | 0.8(mm) |
| Cutting Circumstance | Dry Cutting |

절삭력을 측정하기 위해 공구동력계를 CNC선반의 Turret 공구대 측면에 지그를 제작 설치하였고, 절삭가공시 채터링과 진동발생을 최소화하기위해 가공시편을 심압대로 지지한 후 실험에 임하였다.

절삭력 측정은 절삭깊이를 고정시키고 공구의 이송속도를 변화를 주어 3분력을 측정하였다. 시험편의 표면의 거칠기 측정시 Cut-off 값은 0.8mm, 이송속도는 0.5mm/s로 하였고, 측정범위는 20 μ m로 측정을 하였으며, 측정거리는 시편의 가공길이 10mm인 점을 고려하여 시작 부분과 끝나는 부분을 각각 1mm씩을 뺀 8mm를 측정 하였다. 표면거칠기 값은 정확성을 위해 축방향으로 120°씩 회전시켜 3회 측정하여 R_a 값으로 거칠기 값을 정리했다.

절삭가공에서 배출된 칩의 형태 분석과 측정은 산업용현미경 i Cam scope로 배율을 x300으로 하였으며, 측정시 Light Guide Cap를 사용하여 lamp의 빛이 피삭재에 집중조사 될 수 있도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭특성

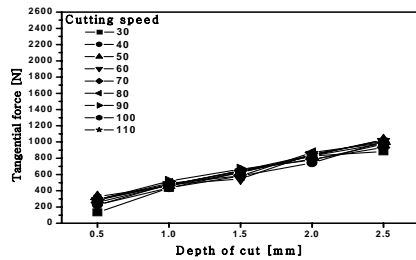
3.1.1 주분력

주분력의 크기는 같은 절삭깊이와 이송속도에 대한 조건에서는 절삭속도가 증가하여도 주분력은 큰

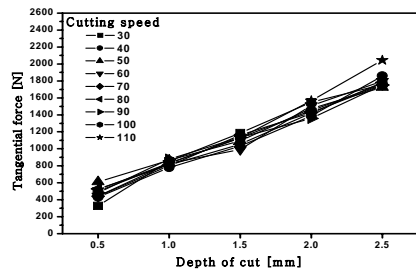
차이를 보이지 않았다.

Fig. 2의 (a), (b), (c)는 공구의 이송속도를 변화에 따른 절삭력과 절삭깊이, 절삭속도와와의 관계를 각각 나타낸다.

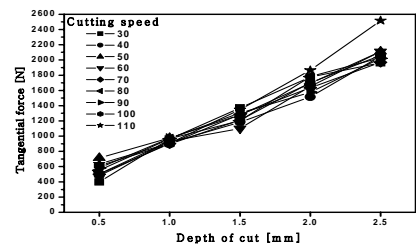
그림에서 보는 바와 같이 모든 절삭속도의 절삭깊이 1.0mm에서 주분력의 편차가 가장 안정적이었으며, 절삭깊이 0.5mm에서는 주분력의 편차가 가장 심하여 선도가 불규칙하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 절삭깊이가 작을수록 비절삭 에너지에 미치는 영향이 커지고, 절삭깊이가 클수록 비절삭 에너지에 미치는 영향이 작아진다는 치수효과(Size effect)에 의하여 절삭력이 불규칙적인 것으로 사료된다.



(a) Feed rate 0.1mm/rev



(b) Feed rate 0.25mm/rev



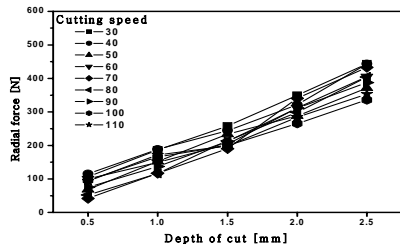
(c) Feed rate 0.3mm/rev

Fig. 2 Tangential force according to depth of cut

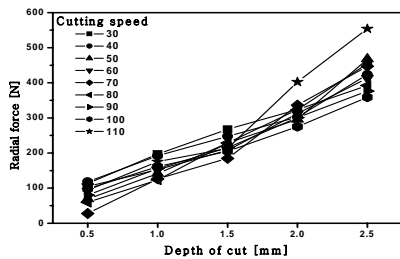
Fig. 2(b)의 절삭속도 110m/min 경우 공구의 이송속도 0.25mm/rev, 절삭깊이 2.0mm에서부터는 다른 조건에 비해 상대적으로 큰 증가를 보였다. 이는 티타늄 합금의 종탄성계수가 강의 50%정도 밖에 되지 않으며, 열전도율 또한 강에 비하여 15%정도 밖에 되지 않아서, 높은 절삭력이 발생하여 공구의 비정상 마모가 시작된 것으로 사료된다.

3.1.2 배분력

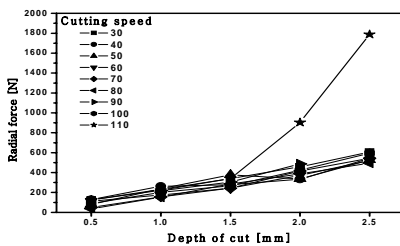
Fig. 3(a), (b), (c)는 이송속도 0.1~0.3mm/rev 범위에서 절삭깊이에 따른 절삭속도와와의 관계에 있어 배분력의 크기를 나타내고 있다.



(a) Feed rate 0.1mm/rev



(b) Feed rate 0.15mm/rev



(c) Feed rate 0.3mm/rev

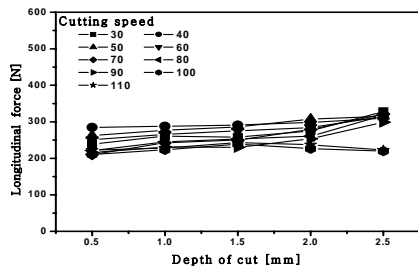
Fig. 3 Radial force according to depth of cut

공구의 여유면 마모와 밀접한 관계를 가지고 있는 배분력은 절삭깊이 증가에 따라 전반적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있었으나, Fig. 3 (b)와 같이 절삭속도 110m/min, 절삭깊이 2.0mm, 공구의 이송속도 0.15mm/rev에서부터 비정상적인 증가량을 보였다. 공구의 비정상 마모가 시작된 것으로 사료되며, Fig. 2 (b)의 주분력과 비교해 보면 절삭속도와 절삭깊이의 조건에서는 비정상적인 증가량을 보인 조건이 같았으나, 공구의 이송속도에서 0.15 mm/rev로 주분력보다 먼저 시작되는 것을 알 수 있었다.

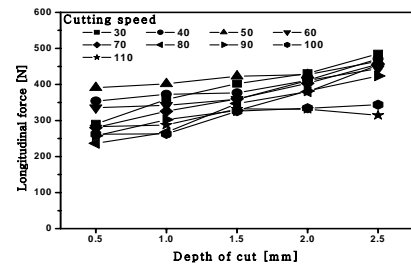
Fig. 3(C)의 이송속도 0.3mm/rev에서는 절삭속도 110m/min, 절삭깊이 2.0mm의 조건에서 급격한 변화가 생기는 것을 알 수 있다. 이는 이송속도의 증가로 인하여 공구여유면의 마찰력 증가로 사료된다.

3.1.3 이송분력

Fig. 4의(a)(b)는 이송분력의 크기를 이송속도 0.1, 0.3mm/rev에 있어 절삭속도와 절삭 깊이와의 관계를 나타내고 있다.



(a) Feed rate 0.1mm/rev



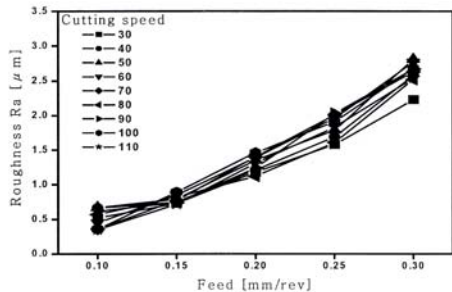
(b) Feed rate 0.3mm/rev

Fig. 4 Longitudinal force according to depth of cut

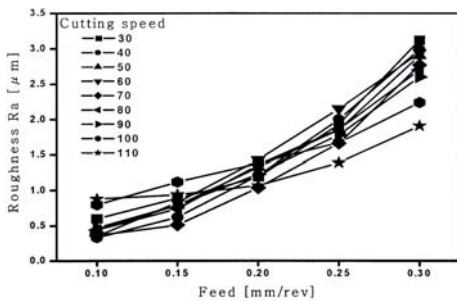
이송분력은 모든 절삭조건에서 절삭 깊이와 이송 속도 영향을 적게 받는 것을 알 수 있었으며, 특이한 사항은 절삭속도 30~90m/min의 조건에서는 절삭깊이가 증가하면서 미소량씩 이송분력이 증가하였으나, 절삭속도 100~110m/min에서는 절삭깊이 1.5 mm를 넘어서면서 미소량씩 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 높은 절삭력으로 인하여, 공구가 소재를 절삭하기보다는 소재를 밀어내는 스미어링(smearing)발생으로 인하여 주분력과 배분력의 증가되는 것과 상반되게 이송분력이 감소한 것으로 사료된다.

3.2 표면 거칠기

Fig. 5(a)는 절삭속도 30m/min, 절삭깊이 0.5 mm의 건조에서 공구의 이송속도 변화에 따른 거칠기 값이며, Fig. 5(b)는 절삭속도 110m/min, 절삭깊이 2.5mm의 조건에서 공구의 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기 값이다. 표면 거칠기 값은 절삭깊이의 영향보다 공구의 이송속도 영향을 더 받는 것으로 나타났다.



(a) Depth of cut 0.5mm



(b) Depth of cut 2.5mm

Fig. 5 Surface roughness according to depth of cut

Fig. 5(a)에서 이송속도 0.1mm/rev의 거칠기 값이 이송속도 0.15mm/rev에 비교하여 불규칙한 값을 보이는 것은 절삭력 측정에서 언급한 치수효과로 인한 결과로 사료되며, Fig. 5(b)의 절삭속도 100m/min 과 110m/min 에서 비정상적인 표면 거칠기 값이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 이송분력에서 언급한 스미어링과 연관이 있는 것으로 사료된다.

3.3 칩 처리성

본 실험에 사용된 칩 브레이크는 중 절삭 형으로서 절삭인선부의 각이 11.5°이며 측면의 각이 10.5°로 길이는 각각 0.28mm이다. 절삭가공 시 칩 브레이크에 의한 칩 발생형상을 관찰하여 INFOS 기준에 의해 분류하였으며, 안정, 사용, 불안정한 영역 중에 불안정 영역을 제외한 영역들을 분류하여 그래프 한 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, 절삭속도 조건에 따라 배출된 칩 형상사진을 Photo. 2(a)~(g)에 나타냈다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 칩 처리성은 절삭깊이의 영향보다 이송속도의 영향을 더 받는 것으로 나타났다, Photo. 2(e)에 나타난 바와 같이 칩 처리성이 사용가능한 영역이 가장 많은 절삭속도 90m/min에서는 안정된 칩의 형상인 Short tubular chips 와 spiral tubular chips의 칩들이 주로 나타났으며, 절삭속도 90m/min이하에서의 사용가능한 영역에서는 주로 Long tubular chips형상이 나타났다.

Photo. 2(b)의 절삭속도 60m/min에서 안정된 영역이 가장 적었고, 전체 실험조건에 있어 불안정한 칩 형상을 보인 영역의 조건들서는 주로 Tangled chips 형상이 나타나는 것을 알 수 있었다.

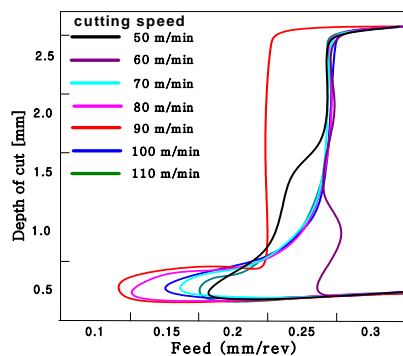
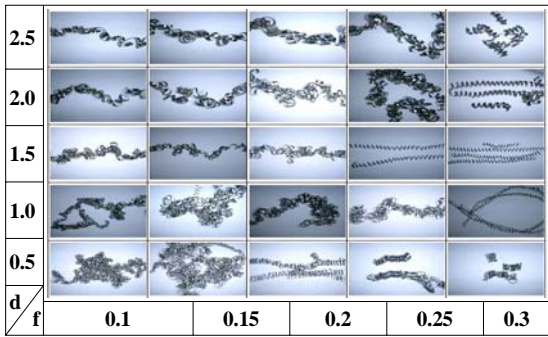
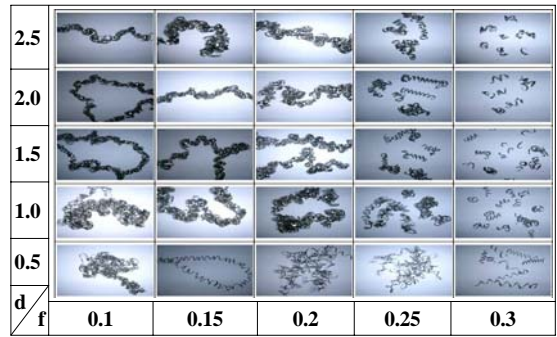


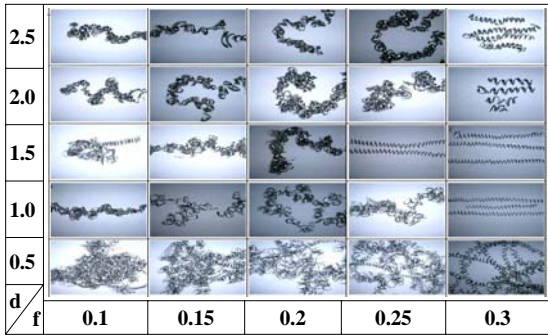
Fig. 6 Good region for chip treatment in cutting speed



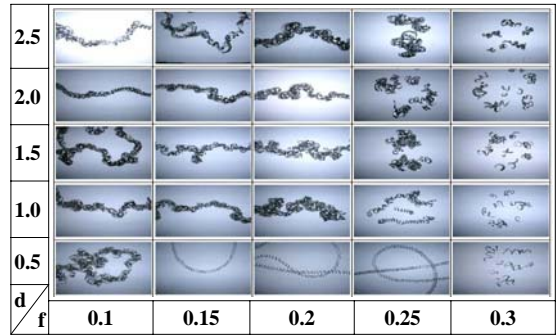
(a) V=50m/min



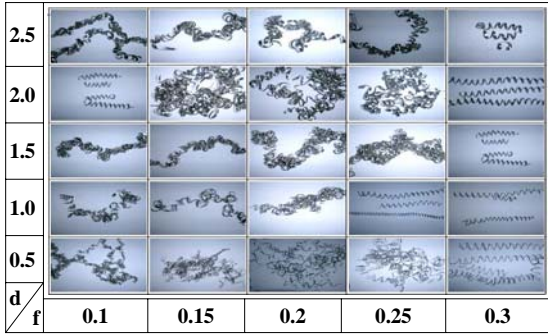
(e) V=90m/min



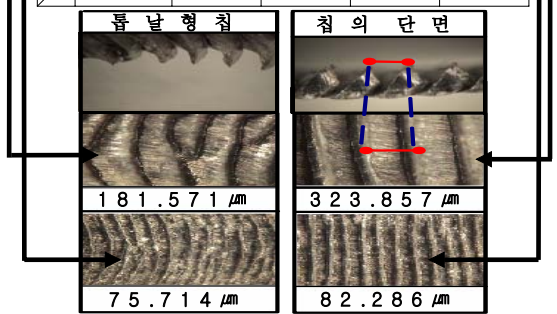
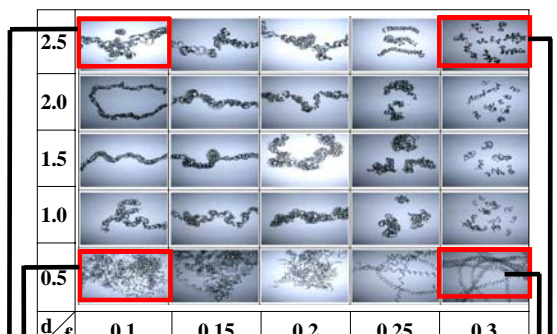
(b) V=60m/min



(f) V=100m/min



(c) V=70m/min



(g) V=110m/min

Photo. 2 Chip treatment of Ti-6Al-4V alloy

Photo. 2(g)는 절삭속도 110m/min에서 배출된 칩의 모양과 칩 안쪽면의 산의 피치의 크기를 나타낸다. 실험에서 배출된 칩의 모양은 모든 조건에서 난삭재 가공의 특징인 톱날형 칩의 모양과 전단형 단면형상을 보여 주었으며, 칩 안쪽면의 산의 피치를 측정할 결과 공구의 이송속도의 영향보다 절삭깊이의 영향을 더 받는 것으로 나타났다. 또한 칩 산의 형태에 있어 불안정한 칩일수록 칩 산의 형태가 곡선의 형태를 이루는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

PVD코팅기술을 적용한 TiAlN코팅 공구를 이용하여 Ti-6Al-4V 티타늄 합금의 절삭가공을 절삭속도 30~110m/min, 절삭깊이 0.5~2.5mm, 이송속도 0.1~0.3mm/rev로 변화를 주어 절삭특성에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 실험결과 주분력은 절삭속도 100, 110m/min의 조건을 제외한 절삭속도 30~90m/min에서 절삭상태는 양호하였으며, 절삭깊이 1.0mm에서 가장 안정적인 값을 보여주었다.
2. 표면거칠기는 공구의 절삭깊이의 영향을 적게 받고 이송속도 영향을 많이 받았으며, 절삭속도 100m/min, 절삭깊이 2.0mm, 공구 이송속도 0.25mm/rev이상에서는 표면거칠기 값은 비정상적으로 낮아짐을 알 수 있었다.
3. 배출된 칩들의 형상사진을 절삭조건들에 따라 도표화한 결과 이송속도가 증가할수록 칩의 형태는 양호하였으며, 절삭속도 90m/min, 이송속도 0.25~0.3mm/rev에서 양호한 칩 처리성을 보였다.

참고문헌

1. (社)チタニウム協會, “チタンの加工技術,” 日刊功業新聞社, pp. 8-25, 1992.
2. 이용택, 김승언, 현용택, 정희원, “꿈의 신소재 티타늄,” 한국철강신문, pp. 1-30, 2003.
3. 이용태, 이종형, “티타늄 가공기술,” 청문각, pp. 25-35, 2002.

4. Zlatin, N., Christopher, J. D. and Cammett, J. T., “Machining of new materials,” USAF Technical Report AFML-TR-73-165. 1973.
5. Komanduri, R., Von Turkovich, B. F., “New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys,” Wear, Vol. 69, pp. 179-188, 1981.
6. Mcquillan, A. D. and Mcquillan, M. K., “Titanium,” Journal of the Franklin Institute,” Vol. 261, pp. 574, 1956.
7. Elgomayel, J. I., Radavich, J. F. and Tseng, Miendger, “The study of the wear mechanism of titanium carbide coated carbide tools,” J. Machine Tool Design and Research, Vol. 19, pp. 205-219, 1979.
8. 홍우표 “Ti-6Al-4V 타이타늄 합금 旋削특성에 관한 研究,” 충남대학교, 2001.
9. Cho, G. J., Park, J. N., Lee, S. C., “A Study on the Cutting Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy using TiAlN(PVD) Coated Tool,” Proceeding of KSMPE, pp. 78-81, Nov, 2004.