

열처리된 티타늄 합금의 연삭가공 특성

Characteristics of Surface Grinding for Heat Treated Titanium Alloy

허순(경남대 대학원), 김원일, 왕덕현, 이윤경(경남대 기계자동화공학부)

S. Heo(Graduate School, Kyungnam Univ.), W. I. Kim, D. H. Wang, Y. K. Lee(Kyungnam Univ.)

Abstract

A use of Titanium alloy as a structural material is increasing lately. Among those titanium alloys, Ti-6Al-4V alloy is the most popular one with taking 2/3 of it's market. Also, Ti-6Al-4V alloy can get the stability of organization and product measure, and the evaluation of the cutting ability and the mechanical characteristics. The point in titanium alloy work is on how treat the heat generated during grinding. Because the heat conductivity of titanium alloy is unnegligibly low, the grinding heat is accumulated in workpiece, and it cause the increasing of grinding grits' wear and the rough grinding surface. So, these characteristics in grinding of titanium alloy will change the mechanical characteristics of the titanium alloy. From this study, the mechanical characteristics of annealed Ti-6Al-4V alloy after grinding was concerned with checking out the bending strength values, and the factor of the change and the difference was analyzed after analyzing the surface roughness and the image from SEM.

Key Words : titanium alloy(티타늄 합금), annealing(소둔), bending strength(굽힘응력), surface roughness(표면거칠기), SEM(열전계 방사형 전자현미경)

1. 서론

티타늄 합금은 비교적 새로운 구조용 재료로서 그 용도가 넓어져 가고 있다. 내식성 재료로서 비료공장의 합성탑, 각종 밸브와 그 기관, 계측기류, 열교환기 등에 이용되고, 또 석유정제·석유화학공업관계 기타 합성섬유공업·ClO₃표백장치·소다공업·유기약품공업 등에도 이용되어 가고 있다. 티타늄합금은 450℃까지의 온도에서 강도·중량비가 높고 내식성도 좋으므로 항공기 엔진 주위의 기체재료, 제트엔진의 컴프레서 부품재료 등에 이용된다[1].

티타늄의 성질을 개선하기 위하여 첨가되는 합금원소는 Al, Sn, Mn, Fe, Cr, Mo, V 등이며, 이러한 원소의 효과를 금속조직적으로 분류하면 Ti의 α 상을 안정화하고 α 상 구역을 확대하는 원소와, β 상을 안정화하고 β 상 구역을 확대하는 원소로 나눌 수 있다. 주요한 실용합금은 $\alpha + \beta$ 조직의 것이며, 그 중에서도 Ti-6Al-4V 합금이 전세계에서 가장 많이 사용되고 있는 $\alpha + \beta$ 합금으로 전체 티타늄합금 시장의 2/3를 차지한다. 압연성, 단조성, 성형성, 용접성, 고온특성, 저온특성 등 모든 면에서 우수하므로 각종 형재, 단조품, 주물용으로도 사용되고 있다. 또한 Ti-6Al-4V 합금은 소둔(annealing) 열처리함으로써 조직의 안정화, 제품치수의 안정화, 절삭성의 향상 또는 기계적 성질의 향상을 얻을 수 있다.

티타늄합금의 절삭가공상의 특성을 보면 용접이 높고, 비중은 철과 알루미늄의 중간 정도이다. 열전도율 및 선팽창 계수, 탄성계수가 작다. 티타늄은 철강 등의 재료에 비해서 내식성, 내열성, 인장강도 등이 우수한 특성을 가지고 있다. 그러나 티타늄을 절삭가공하는 경우, 이와 같은 특성 때문에 공구수명을 단축시키는 문제가 발생하기 쉽다. 티타늄이 가진 재료 특성과 절삭가공시에

일어나기 쉬운 문제에 대해서 간단히 말하자면 우선, 인장강도가 1500MPa 이상의 고강도 티타늄 합금은 절삭공구 선단에 과도한 힘을 주면 조각이 나거나 마멸되기 쉽다. 열전도율이 대단히 작기 때문에 절삭중에 발생한 열이 방출되지 않고 공구와 가공물에 축적되어 공구의 마모가 크다. 힘을 가하였을 때 변형의 정도를 나타내는 영률이 작기 때문에, 절삭했을 때에 가공물이 보통 강의 약 2배로 변형한다. 얇은 가공물에서는 가공정밀도가 저하되거나, 변형을 일으키는 경우도 있다. 공구의 마모가 큰 절삭 조건이나, 얇은 절삭편이 나오는 조건으로 절삭할 경우, 절삭편이 연삭하는 경우가 있다. 이처럼 티타늄 재료는 화학적으로 대단히 활성이 큰 금속이기 때문에 공구를 마모시키기 쉽다. 절삭속도를 빠르게 하면 절삭 온도가 높아져 티타늄이 더욱 활성화되며, 또한 마모가 보다 심해진다[2].

티타늄의 연삭가공에 있어서의 포인트는 연삭열을 어떻게 하는가에 달려있다. 티타늄은 열전도율이 매우 작기 때문에 연삭열이 가공점에 축적되어 스톨 입자의 마모가 크게 되며 그 결과 연삭소착이 발생하여 표면이 거칠게 될 뿐만 아니라, 표면에 균열이 생긴다. 이러한 특성들로 인해 티타늄합금의 연삭가공시 표면의 균열과 가공시 발생하는 열로 인한 표면의 금속 조직 변화로 그 기계적 특성이 변하여 티타늄합금 제품의 품질에 크게 영향을 미칠 것으로 추정된다.

본 논문에서는 소둔처리한 Ti-6Al-4V 합금을 연삭가공한 후 굽힘응력을 측정하여 기계적 성질의 변화를 관찰하고, 전자현미경을 이용한 시편의 표면을 정밀 분석 및 표면조도기로서 표면의 거칠기를 측정하여 그 변화의 원인을 규명하기로 한다.

2. 실험장치 및 방법

Ti-6Al-4V 시편을 연삭가공하기 위하여 범용 수평축 평면연삭기(유일공업(주),한국)를 사용하였다.(Fig. 1) 비자성인 티타늄 시편을 마그네틱 척에 직접 부착할 수 없으므로, 자성을 띤 바이스에 시편을 고정하여 연삭기의 마그네틱 척 베이스에 부착하였다.

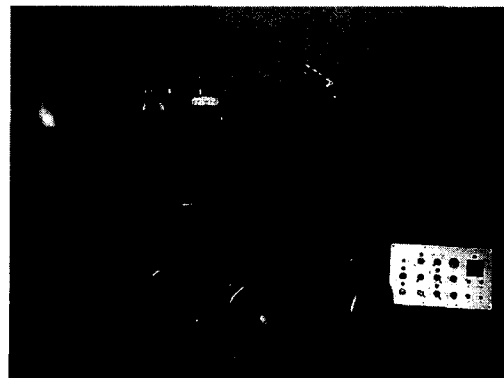
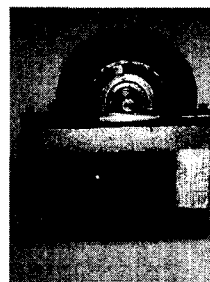
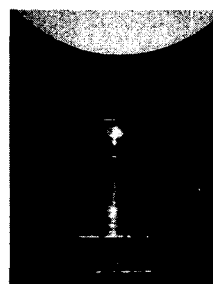


Fig. 1 Horizontal spindle surface grinder

스톨의 회전시 떨림이나 진동을 방지하기 위해 Fig. 2 (a)의 스톨 발렌싱기를 사용하고, 새로운 연삭날을 생성하기 위해 Fig. 3 (b)의 스톨 드레서를 사용하였다.



(a) Grinding wheel balancer



(b) Grinding wheel dresser

Fig. 2 Grinding wheel balancer and dresser

본 실험에서는 삼양연마(주)에서 제작한 외경 205mm, 내경 50.8mm, 폭 19mm인 GC스톨로써 입도 60, 결합도 K, 조직 7, 결합체는 V이다.

피삭재는 현대티타늄(주)에서 생산하는 지름 40mm 짜리 Ti-6Al-4V 합금환봉으로써 소둔처

리가 되어있다. 시편은 와이어 방전가공시료써 굽힘응력측정을 위한 표준 크기인 4×4×40 크기로 절단하였다. 아래 Table 1은 소둔처리한 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 성질을 표로 나타낸 것이다.

실험에 앞서 지름 40mm의 환봉을 와이어 방전가공기료써 4×4×40의 크기로 시편 제작을 하였다. 연삭시 슛들의 떨림을 예방하기 위해서 밸런싱기료써 슛들의 동적 균형을 맞추고, 슛들입자 사이의 눈막힘 현상이나 마멸을 고려하여 매

Table 1 Mechanical properties of annealed Ti-6Al-4V

Mechanical properties	Material(Ti-6Al-4V)	
	Room temp. 20~30(°C)	High temp. 916(°C)
Tensile strength(kg/mm ²)	101	74
Yield strength(kg/mm ²)	94	67
Elongation(%)	14	14
Contraction of area(%)	30	35
Impact strength(Joule)	19	
Hardness(Rc)	36	

시편을 절삭하기에 앞서 다이아몬드 드레서로 슛들을 드레싱 하였다.

가공을 시작하는 초기 절입시에 가공할 시편의 면이 전체적으로 고르게 가공되도록 매번 시편고정을 할 수가 없다. 그러므로 시편의 가공면이 전체적으로 고르게 가공되면서 시편준비시에 생긴 와이어 방전가공부를 충분히 제거 할 때까지 약 2.5 μ m 씩 절입하여 10회 정도 가공하였다. 그후 지정된 각각의 조건에 맞추어 시편을 가공하였다. 가공조건은 이송속동 3가지에 절입깊이 4가지로 하였다. 구체적인 가공조건들은 아래 Table 2에 표기되어 있다.

Table 2 Experimental condition

	Conditions
Grinding wheel	GC60K7V
Depth of grinding(μ m/pass)	5, 10, 15, 20
Table speed(m/min)	5, 10, 15
Spark out(circle)	2(up & down)
Grinding speed(rpm)	3460

3. 실험결과 및 고찰

다음은 표면조도기에 의한 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 먼저 Table 3은 절삭방향으로의 중심선 평균거칠기를 나타낸 것이다. 절삭깊이가 증가할수록, 절입깊이가 깊어 질수록 표면 거칠기가 나빠지는 경향이 나타난다. 하지만, 절입깊이가 5, 10 μ m에서 보면 테이블 이송속도가 10m/s 일 때가 15m/s일 때 보다 표면이 거칠다. 이 원인은 서론에서 언급한 것과 같이 티타늄의 가공특성을 보면 추정할 수 있다. 티타늄은 열전도율이 매우 낮은 금속이므로 가공시 열이 가공부에 축적되어 가공성을 떨어뜨린다. 이로 부터, 테이블 이송속도가 10m/s일 때는 5m/s일 때보다 과부하로 인한 절삭열이 발생하여 표면이 잡자기나빠진 것이고, 이송속도가 15m/s일 때는 이송속도가 빨라 선가공에서 발생한 열이 직접적으로 영향을 미치지 못한것이라 추정된다.

Table 3 Centerline average height roughness, Ra(μ m), at cutting direction

removal depth table speed	5 μ m	10 μ m	15 μ m	20 μ m
5 m/s	0.51	0.70	0.82	1.22
10 m/s	1.09	1.47	2.48	2.77
15 m/s	0.90	1.34	2.52	2.80

Table 4는 가공방향에 수직한 방향으로의 중심선 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 테이블 내에서의 전반적인 경향은 Table 3과 같이 이송속도와 절입깊이가 증가 할수록 표면이 나빠짐을 알 수 있다. Table 3의 가공방향으로의 거칠기와 비교하면 이송속도 5m/s와 15m/s에서는 약간 더 양호한 값을 나타낸다. 하지만, 이송속도 10m/s에서는 반대로 더 거칠어 짐을 알 수 있다. 이 역시, 열의 누적으로 인한 번닝에 의한 결과로 보아지며, 특히 절입깊이가 10에서 15 μ m으로 증가할 때, 표면이 심하게 거칠어 진다.

Table 4 Centerline average height roughness, $R_a(\mu\text{m})$, at vertical direction of cutting direction

removal depth table speed	5 μm	10 μm	15 μm	20 μm
5 m/s	0.33	0.82	0.96	1.33
10 m/s	1.22	1.75	4.37	4.90
15 m/s	0.67	1.97	2.83	3.69

측정부의 가장 높은 값과 낮은 값 사이의 거리를 나타내는 최대높이 거칠기가 Table 5와 6에 나타나있다. 먼저, Table 5는 절삭방향에서의 표면을 나타낸 것이다. 전체적 경향은 중심선 평균 거칠기와 동을 하나, 이송속도보단 절입깊이의 변화에 좀더 민감하게 반응 함을 알 수 있다.

Table 5 Maximum height roughness, $R_{\text{max}}(\mu\text{m})$, at cutting direction

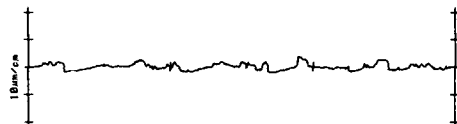
removal depth table speed	5 μm	10 μm	15 μm	20 μm
5 m/s	3.64	7.00	6.48	9.62
10 m/s	6.40	12.22	16.48	15.32
15 m/s	6.34	9.80	19.84	19.82

Table 6은 가공방향에 수직인 방향의 최대높이 거칠기를 보여준다. 전체적인 값은 Table 5보다 조금 거칠다.

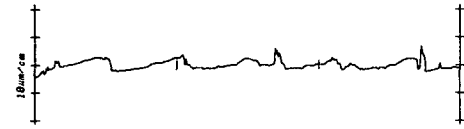
Table 6 Maximum height roughness, $R_{\text{max}}(\mu\text{m})$, at vertical direction of cutting direction

removal depth table speed	5 μm	10 μm	15 μm	20 μm
5 m/s	2.98	7.18	7.18	12.60
10 m/s	8.50	11.32	21.90	24.66
15 m/s	4.98	12.52	15.72	21.38

다음의 Fig. 3은 같은 테이블 이송속도에서 절삭 방향의 표면 거칠기를 그래프로 나타낸 것이다. 절입깊이가 5에서 10, 15, 20 μm 으로 증가할수록 표면이 거칠어짐을 잘 보여준다.



(a) Cutting depth 5 μm



(b) Cutting depth 10 μm



(c) Cutting depth 15 μm



(D) Cutting depth 20 μm

Fig. 3 Surface roughness at cutting direction, in the same table speed (15m/s),

Fig. 4는 15 μm 의 같은 절입깊이에서 테이블 이송속도에 따른 표면 조도의 변화를 보여준다. 측정 방향은 Fig. 3과 같이 가공방향이다. 이송속도가 증가함에 따라 면이 거칠어 지고 있다. 하지만, 여기서 하나 주목할 부분은 이송속도가 증가함에 따라 그래프가 점점 주기성을 띠는 것이



(a) Table speed 5m/s



(b) Table speed 10m/s

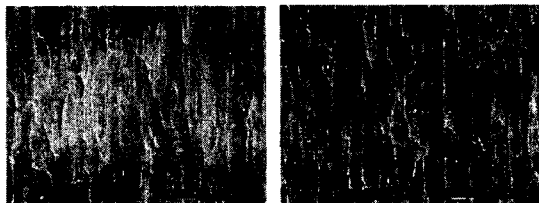


(c) Table speed 15m/s

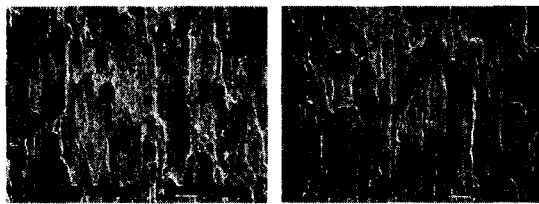
Fig. 4 Surface roughness at cutting direction, in the same cutting depth (15 μm),

다. 이송속도 15m/s의 그래프를 보면 세 개의 높은 피크군이 뚜렷이 구분된다. 이송속도가 너무 빨라 슛돌 입자가 시편을 깎아내지 못하고 시편이 슛돌에 밀려 물결 모양으로 퇴적된 것이다.

Fig. 5는 열방사형 주사전자 현미경으로 Ti-6Al-4V 합금 시편을 촬영하여 얻은 영상이다. 이송속도는 5m/s로 동일하고 절입량을 변화시킨 시편이다. (a)에서 (d)로 갈수록 표면에 있는 연삭흔적이 크고 거칠어 짐을 알 수 있다.



(a) removal depth 5 μ m (b) removal depth 10 μ m



(c) removal depth 15 μ m (d) removal depth 20 μ m

Fig. 5 SEM image of the workpiece, table speed 5m/s,

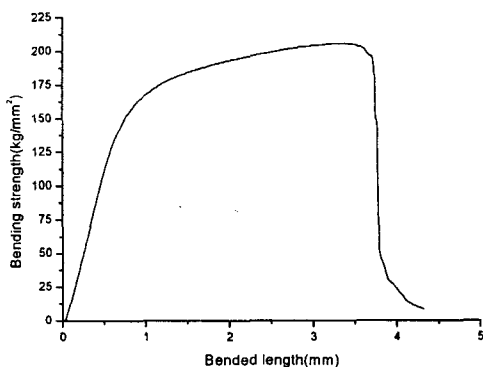


Fig. 6 Bending strength graph, cutting depth : 5 μ m, table speed : 5m/s

Fig. 6은 Ti-6Al-4V 합금의 굽힘응력 변형률 선도이다. 130kg/mm²까지 탄성변형 하다가, 넘어서면서부터 소성변형하여 207kg/mm² 부근에서 최대로 올라갔다가 파단되어 응력이 급속히 떨어지는 것을 보여주고 있다. 마지막 까지 부러지지 않고 꺾이기만 하는 걸로 봐서 인장력이 상당히 높을 것으로 추정된다.

아래의 Table 7은 테이블 이송속도 5m/s에서의 굽힘응력의 변화를 보여주고 있다. 절입깊이가 증가할 수록 굽힘응력값이 증가함을 알 수 있다. 이는 절입깊이가 증가 할수록 시편이 가열되어 경화된 것으로 추정된다.

Table 7 Bending strength at table speed 5m/s

Cutting depth	5 μ m	10 μ m	15 μ m	20 μ m
Bending strength (kg/mm ²)	134.10	136.85	147.35	148.63

4. 결론

본 연구에서는 열처리(annealing)된 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)을 테이블 이송속도와 절입깊이를 달리하여 연삭가공한 것을 표면조도기와 열전계 방사형 전자현미경(SEM)을 이용하여 표면을 시각적 수치적으로 분석하였고, 굽힘응력 시험기를 이용하여 각 조건에서의 시편의 기계적 성질을 비교하였다.

- [1] 절입깊이와 이송속도가 증가함에 따라 표면 거칠기는 나빠졌다. 단, 이송속도가 10m/s 일 때, 이송속도가 15m/s 였을 때 보다 표면 거칠기가 나빴다. 이는 열전도를 매우 낮은 티타늄의 특성 때문으로 절삭열이 누적되어 시편이 타버린 결과이다. 이송속도 15m/s에서는 연삭스튬들이 빨리 지나가 버려 열이 누적될 여유가 없기 때문에 이송속도 10m/s에서 보다 나은 표면을 얻을 수 있었다.
- [2] 테이블의 이송속도를 높이면 슛돌이 소재를 제때 제거하지 못 하여 시편이 슛돌에 밀려 물결모양을 형성하고, 그 물결문양의 간격은 이송속도의 증가에 따라 멀어진다. 절삭깊이를 깊이하면 재료가 가공방향으로 깊이 패이고 버닝이 일어나기 쉽다.

- [3] 절입깊이가 증가 할수록 굽힘응력은 증가한다. 절삭시 발생하는 열로 인해 시편이 경화된 것으로 추정된다.

참고문헌

- [1] 梁 勳永, "新金屬材料學," 文運堂, 제 4장, 18절, pp. 441-450, 1996.
- [2] 이 용태, "티타늄 가공기술," 한국 티타늄협회, 제 1장, pp. 1-18, 제 2.5장, pp. 49-52, 2000.
- [3] S. Malkin, "Grinding Technology," Society of Manufacturing Engineers, 1989
- [4] 김 현철, "Ti-6Al-4V 합금의 피로거동에 미치는 온도, 주파수 및 미세조직의 영향," 한국자동차공학회논문집, 제 4권, 제 1호, pp. 198~207, 1996.
- [5] Gere & Timoshenko, "材料力學," 清文閣, 1995.