한국공작기계학회 2001년도 추계학술대회 논문집 pp.172~178

티타늄합금의 와이어 방전가공과 연삭가공시 기계적 특성

Mechanical Characteristics when Wire Electrical Discharge Machining and Surface Grinding for Titanium Alloy

김종업*(창원기능대학 컴퓨터응용기계과), 왕덕현, 김원일, 이윤경(경남대 기계자동화공학부)

J. U. Kim*(Changwon Polytechnic College), D. H. Wang, W. I. Kim, Y. K. Lee(Kyungnam Univ.)

Abstract

Titanium alloys have lightness, high strength and good corrosion resistant characteristics, and broadly used in manufacturing parts for military and aerospace industries. And these alloys also are recognized for organism materials comparatively and used as fixing ones in the human body. Nevertheless thess alloys have excellent properties such as corrosion resistance, heat resistance, and good tensile strength, it is difficult to machine by traditional methods because of high hardness and chemically activated property. So higher tool wear is expected when cutting by tools. Therefore, it is required nontraditional machining process. And the mechanical characteristics such as surface structure and shape, hardness and bending strength are studied for wire electrical discharge machined and surface ground titanium alloys for various heat-treated conditions.

Key Words : Titanium alloy(티타늄 합금), Hard-to-cut material(난삭재), Corrosion resistance(내식성), Heat resistance(내열성), Tensile strength(인장강도), Bending strength(굽힘강도), Heat-treated(열처리), WEDM(Wire Electrical Discharge Machining: 와이어 방전가공), Surface grinding(연삭가공)

1. 서론

티타늄 합금은 가볍고 견고하면서도 내식성이 양호하기 때문에 새로운 구조용 재료로써 그 용도가 매우 다양해지고 있다. 이 합금은 절삭가공을 하면 공구수명을 단축시키는 문제가 발생한다. 얇은 칩(chip)이 나오는 조건으로 절삭할 경우, 칩이 연소하는 경우가 있다. 이처럼 화학적으로 대단히 활성이 큰 금속이기 때문에 공구를 마멸시키기 쉽다. 절삭속도를 빠르게 하면 절삭온도가 높아져 티타늄이 더욱 활성화되며, 또한 공구의 마멸이 보다 심해진다[1,2]. 그러므로, 일반 절삭가공과는 다른 가공법으로서 와이어 방전가공법과 연삭가공법을 선택할 수 있다.

와이어 방전가공법은 전자소자와 CNC기능화의 발달로 현재의 방전가공기와 이에 따른 가공기술은 어느 기술에 못지 않게 급속히 발전하여 왔으나, 방전가공에 있어서 피해야 될 부분은 방전집중현상에 의한 아크방전이다[3]. 현재 극간에 발생하고 있는 방전상태가 정상적인지 비정상적(아크방전)인지를 판단해서 만약 아크방전 상태라면 정상적인 방전이 되도록 어떤 일련의 조치를 취해야만 할 것이다. 그것이 방전제어회로 설계의 목적이며 가공속도와 정밀도를 향상시키는 방법이다.[4,5] 또한, 티타늄 합금의 연삭가공법에 대하여 Jingxin Ren 등[6~9]은 연구를 통해서 티타늄 연삭가공시 최적의 숫돌과 가공조건 등을 제시하였다. 숫돌로는 탄화규소계인 GC숫돌이 티타늄 합금의 가공시 사용상의 용이함, 가격 등에서 적합하다고 말할 수 있다.

본 연구에서는 티타늄합금을 열처리 공정에서 어니일링 및 용체화와 시효처리를 하여 와이어방전가공에서 가공조건들인 인가전압, 인가전류, 방전시간, 방전 휴지시간 및 오프셋량 등을 변화시키면서 와이어가공 횟수를 1차에서, 2차, 3차로 증가시키면서 실험을 수행하여, 열처리된 티타늄합금의 가공시 가공조건에 변화를 주었을 때 가공특성에 어떠한 변화가 나타나는지를 규명하고 최적의 와이어방전 가공조건을 제시하고자 하였다. 또한 후가공으로 연삭가공에서는 테이블 이송속도와 절입깊이를 달리하여 연삭가공한 후 표면거칠기 측정장치로 가공면의 거칠기를 측정하였고, 주사전자현미경을 사용하여 조직의 미세구조 관찰 및 성분분석을 하였으며, 입체현미경으로써 표면상태를 심층 분석하였다. 또한, 굽힘응력과 경도를 측정하여 기계적 성질의 변화를 관찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 실험재료

본 실험에 사용한 장비는 와이어 컷 방전가공기 (DAEWOO A320D, Sodic EX21) 및 수평축 평면연삭기(유일공업)를 사용하였다. 실험에 사용한 재료는 티타늄합금으로서 Ti, Al(6%), V(4%) 이고 열처리 공정에서 Annealing 및 용체화와 시효처리 하였으며, 소재는 φ40×60을 4㎜정방형으로 가공하였다. 이 소재의 실온에서의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. 또한 본 실험에 사용된 와이어 전극은 φ0.25㎜의 황동선 2종을 사용하였고, 연삭숫돌은 외경(205)*폭(19)*내경(50.8), GC60K7V를 사용하였다.

Table 1 Mechanical properties of Ti alloy

Mechanical property	Value
Tensile strength (kg/mm^2)	109
Yield strength (kg/mm^2)	102
Elongation (%)	14
Area contraction (%)	30

2.2 실험소재의 절단

실험소재의 와이어 컷 방전가공 형상은 Fig. 1과 같다. 테이블에 X축 방향으로 장착하여 가로, 세로 각각 6등분하여 가공소재 φ40×60mm을 4mm의 정방형으로 가공하였다.

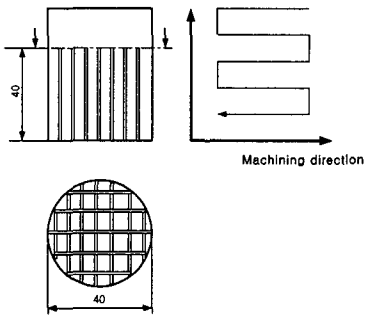


Fig. 1 Workpiece configuration and machining direction

가공방법은 거친가공(1st cut), 다듬가공(2nd, 3rd, 4th cuts)의 개념으로 1 ~4회로 하였으며, 각 횟수별로 가공조건을 변경하여 최적의 데이터를 찾고자 노력하였다. 본 실험에서 선택한 방전조건은 방전에너지에 직접적인 영향을 미치는 방전펄스시간(On time), 휴지시간(Off time), 주 전원피크치(Ip : Peak value current) 등의 값을 변경한 상태에서 가공하였다. 가공조건은 C441~C683을 사용자 정의 기능을 사용하여 입력한 후 프로그램에서 호출하여 사용하였으며, 와이어 이송속도는 10m/min, 와이어 장력은 0.8kg$_f$에 고정하였고, 가공 조건표는 Table 2와 같다.

Table 2 Wire EDM conditions

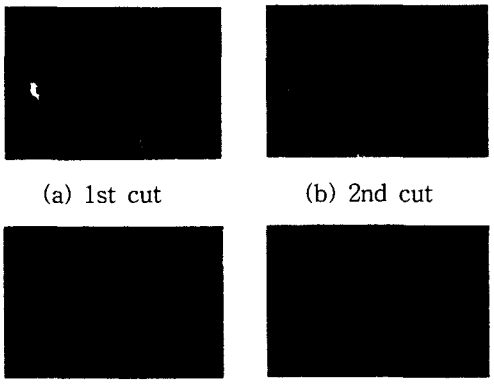
Plate thickness	Machining Cond.	Offset No.	Voltage (V)	Current (A)	T value (mm/min)
40	1st	C441	H225	31	15.2	3.5 - 3.8
	2nd	C623	H150	60	1.5	5.0 - 6.0
	3rd	C653	H135	65	1.1	9.0 - 10.0
	4th	C683	H133	30	0.7	9.0 - 10.0

와이어 방전가공 후 각 시편들을 주사전자현미경, 에너지 분산형 조성분석기, 표면거칠기측정기, 경도측정기, 만능시험기 등을 이용하여 금속표면의 조직 및 형상, 표면거칠기, 경도 및 강도 등의 가공특성을 연구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 방전가공면의 형상 특성

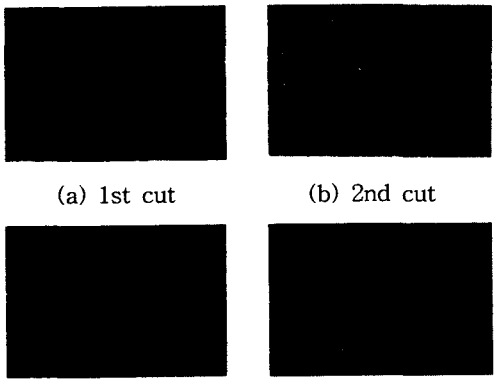
Fig. 2와 3은 주사전자현미경으로 와이어 방전가공면을 관찰한 결과로, 방전가공 횟수에 따라 1st, 2nd, 3rd 및 4th cuts 방전면의 사진들이다. Fig 2, 3의 (a)에서 보는 것처럼 와이어 방전가공면은 와이어 성분의 융착 현상이 두드러져 나타내고 있으며, 이에 따라 표면거칠기가 큰 값을 나타내고 있다. 방전횟수가 증가할수록 이러한 현상은 많이 줄어들고 있어 표면형상이 향상되고 있었다.



(a) 1st cut (b) 2nd cut

(c) 3rd cut (d) 4th cut

Fig. 2 SEM micrographs of EDMed surface (Annealing heat-treated Ti-alloy)



(a) 1st cut (b) 2nd cut

(c) 3rd cut (d) 4th cut

Fig. 3 SEM micrographs of EDMed surface (Solution heat-treated Ti-alloy)

Table 3과4는 EDX 분석에 의한 방전면 표면의 성분들을 무게 중량으로 나타낸 것이다. Ti과 원래 소재에 포함된 성분 Al(6%), V(4%) 이외에 거친방전가공(1st cut)된 면에는 Cu와 Zn 성분이 많이 나타나고 있으나 다듬질 방전가공(2nd cut)부터 현저히 줄어들고 있었다.

Table 3 Element weight percentage of EDMed surface by EDX analysis (Annealing heat-treated Ti-alloy)

	4.44	4.52	4.25	3.82	5.17	5.23
	61.34	62.49	61.86	63.43	65.25	65.69
	4.91	5.01	4.71	5.0	5.10	4.78
Cu	18.91	17.30	20.39	17.92	16.19	15.18
Zn	10.39	10.69	8.89	9.83	8.29	9.12

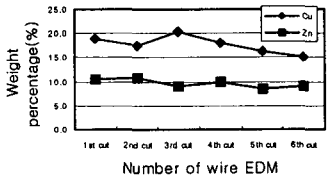


Fig. 4 Weight percentage of Cu and Zn versus number of wire EDM

Table 4 Element weight percentage of EDMed surface by EDX analysis (Solution heat-treated Ti-alloy)

No. of cut / Element	1st cut	2nd cut	3rd cut	4th cut
	3.91	5.21	4.20	7.02
Ti	68.58	79.22	80.44	78.27
	5.90	6.35	6.16	6.87
Cu	16.38	6.14	6.03	4.90
Zn	5.23	3.08	3.17	2.94

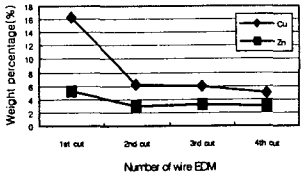
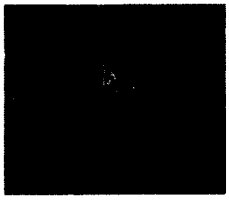


Fig. 5 Weight percentage of Cu and Zn versus number of wire EDM

3.2 연삭가공면의 형상 특성

Fig. 6은 용체화 처리한 후 시효처리한 Ti-6Al-4V 합금을 테이블 이송속도 15m/min, 절입깊이 15㎛의 조건으로 연삭가공한 것을 주사전자현미경으로 얻은 영상이다. (a)는 배율을 100배로 하여 얻은 영상이고, (b)는 (a)의 원형 부분인 A부분을 배율 500배로 확대한 것이다. (c)는 그것을 다시 1500배의 배율로 확대하여 얻은 영상이다. 이 그림들을 보면 시편의 표피 부분이 계단식으로 차곡차곡 쌓여서 이루어 진 것을 볼 수 있다. 이는 연삭깊이가 너무 깊어 연삭칩이 퇴적되어 쌓인 부분을 나타낸다.

(a) Mag. 100



(b) Mag. 500

(c) Mag. 1500

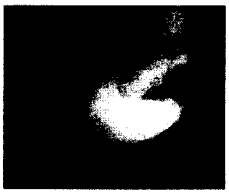
Fig. 6 SEM micrographs of ground surface at table speed 15m/min, cutting depth 15㎛

Fig. 7는 용체화 처리한 후 시효처리한 Ti-6Al-4V 합금을 테이블 이송속도 5m/min, 절입깊이 20㎛의 조건으로 연삭가공한 것을 주사전자현미경으로 얻은 영상이다. (a)는 연소가 일어난 부분을 배율 100배로 확대한 모습이다. (b)는 (a)의 원형 A부분을 배율 1000배로 확대한 사진이며, 연소로 인해 용융된 모습이다. (c)는 (a)의 동그라미 B부분을 2000배의 배율로 확대한 것으로써 연삭유 같은 기름때가 묻은 것이다. (d)는 (a)의 동그라미 C부분을 4000배의 배율로 확대한 것이며, 연삭 숫돌 입자이다.

(a) Mag. 100

(b) Area A (Mag. 1000)

(c) Area B (Mag. 2000)



(d) Area C (Mag. 4000)

Fig. 7 SEM micrographs of ground surface at table speed 5m/min and cutting depth 20㎛

3.3 와이어 방전가공면의 표면거칠기 특성

Fig. 8과 9는 실험재료별로 와이어 방전가공된 면의 피삭재 중심부에서 transverse 방향(테이블 이동방향과 수직방향, T)과 longitudinal 방향에서 각각 8번씩 측정된 중심선 평균거칠기의 평균값들이다. 거친방전(1st cut)과 처음 다듬질 방전(2nd cut)과는 중심선 평균거칠기값이 큰 변화가 없으나 다듬질 방전이 증가할수록(2nd, 3rd, 4th cuts) 중심선평균거칠기는 크게 줄어들어 양호한 표면을 나타내고 있다. 이 경우 longitudinal 방향에서 측정한 결과가 transverse 방향에서 측정한 결과보다 표면거칠기가 나쁘게 나타나고 있다. 이러한 결과는 실험소재의 가공 시 테이블의 이송 방향보다 와이어가 이송되는 방향의 표면거칠기 값이 양호하다는 것을 알 수 있었다.

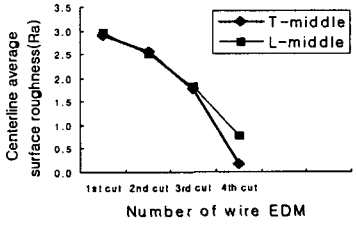


Fig. 8 Surface roughness(Ra) of wire EDMed surface(Annealing heat-treated Ti-alloy)

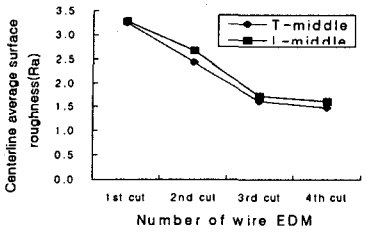


Fig. 9 Surface roughness(Ra) of wire EDMed surface (Solution heat-treated Ti-alloy)

3.4 연삭가공면의 표면거칠기 특성

풀림처리한 Ti-6Al-4V시편의 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 먼저 Fig. 10은 절삭방향으로의 중심선 평균거칠기를 나타낸 것이다. 그래프에 나타난 일반적인 경향은 테이블 이송속도가 증가함에 따라 표면 거칠기 역시 나빠짐을 보여준다. 그림에서 이송속도가 5m/min일 때 보다 10m/min일 때 표면거칠기가 월등히 높아져 15m/min일 때의 거칠기 값과 근사해 짐을 알 수 있다. 테이블 이송속도가 10m/min을 넘으면서부터 절입깊이 10㎛ 이하와 15㎛ 이상에서의 표면거칠기 값이 뚜렷한 차이를 나타낸다. 원인은 티타늄은 열전도율이 매우 낮은 금속이므로 가공 시 열이 가공부에 축적되어 가공성을 떨어뜨린다. 이로부터, 테이블 이송속도가 10m/min일 때는 5m/min일 때보다 과부하로 인한 절삭열이 발생하여 표면이 갑자기 나빠진 것이고, 이송속도가 15m/min일 때는 이송속도가 빨라 선가공에서 발생한 열이 직접적으로 영향을 미치지 못한 것으로 추정된다.

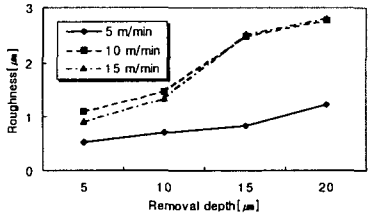


Fig. 10 Centerline average height roughness(Ra) along the cutting direction

Fig. 11은 가공방향에 수직한 방향으로의 중심선 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 테이블 내에서의 전반적인 경향은 Fig. 10과 같이 테이블 이송속도와 절입깊이가 증가할수록 표면이 나빠지는 것을 보여주고 있지만, 표면 거칠기 값의 차이가 커지면서 가공특성을 좀더 명확히 보여주고 있다.

Fig. 10의 가공방향으로의 거칠기와 비교하면 이송속도 10m/min에서 테이블 이송속도 15m/min보다 더 표면이 거칠어짐을 알 수 있다. 이 역시, 열의 누적으로 인한 연소 현상의 결과로 보아지며, 특히, 절입깊이가 10에서 15㎛으로 증가 할 때 표면이 심하게 거칠어진다.

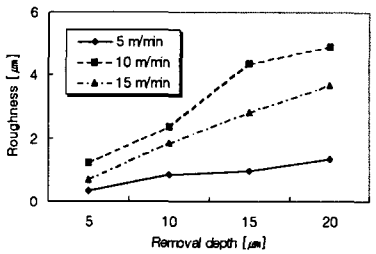


Fig. 11 Centerline average height roughness(Ra) cross to the cutting direction

용체화 처리한 후 시효 처리한 Ti-2Al-4V 합금을 테이블 이송속도와 절입깊이를 변화시키면서 연삭가공한 뒤 획득한 표면거칠기값을 Fig. 12과 13에 비교하여 나타내었다. 먼저, Fig. 12는 가공방향의 중심선 평균거칠기값을 각각의 테이블 이송속도에 따라 비교한 것이다. 테이블 이송속도 5m/min에서는 절입깊이의 변화에 따른 표면거칠기의 변화는 거의 없었다. 테이블 이송속도 10과 15m/min에서는 절입깊이가 깊어질수록 표면이 고아지는 것을 확인할 수 있었다.

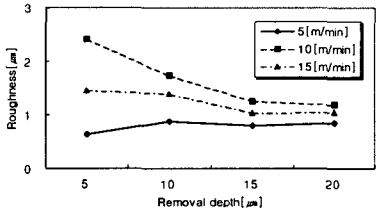


Fig. 12 Centerline average height roughness(Ra) along the cutting direction

Fig. 13은 가공방향에 수직한 방향의 중심선 평균거칠기를 나타내고 있다. 전체적 경향이나 표면거칠기값은 가공방향에서의 것과 비슷한 결과를

나타내었다. 단, 절입깊이 5㎛이고 테이블 이송속도가 10m/min일 때의 거칠기 값은 가공방향에서 보다 1㎛정도 높게 나타났다.

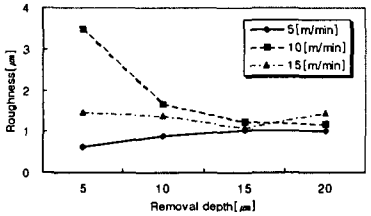


Fig. 13 Centerline average height roughness(Ra) cross to the cutting direction

3.5연삭가공면의 굽힘응력 특성

Fig. 14는 Ti-6Al-4V 합금의 굽힘응력 변형률 선도이다. 130kg/mm^{2}까지 탄성변형 하다가, 그 범위를 넘어서면서부터 소성변형하여 207kg/mm^2 부근에서 최대로 올라갔다가 파단되어 응력이 급속히 떨어지는 것을 보여주고 있다.

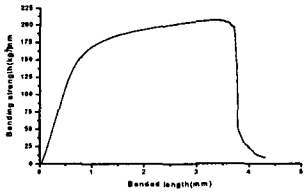


Fig. 14 Bending strength at cutting depth 5㎛ and table speed 5m/min

Fig. 15은 테이블 이송속도 5와 10m/min에서의 굽힘응력의 변화를 보여주고 있다. 5m/min에서는 절입깊이가 증가할 수록 굽힘응력 값이 증가하였고, 10m/min에서는 절입깊이가 15에서 20㎛으로 증가할 때 굽힘응력 값이 떨어졌다.

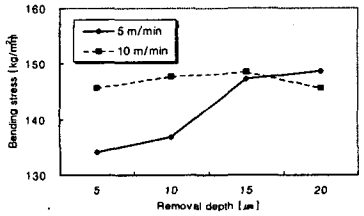


Fig. 15 Bending stress graph according to the change of removal depth

3.6 방전 가공면의 표면경도 특성

Fig. 16은 와이어 방전가공면들의 표면경도를 마이크로 비커스경도기로 10번씩 측정한 결과를 평균값으로 외부 및 내부 영역으로 나타내었다. 와이어 방전횟수가 증가함에 따라 거친 방전(1st cut)에서 다듬질 방전(2nd, 3rd, 4th cuts)으로 진행될수록 방전면의 표면경도값은 증가하는 경향을 나타내고 있다.

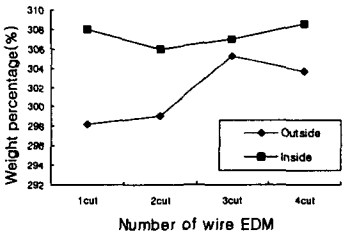


Fig. 16 Hardness(Hv) for number of wire EDM

3.7 연삭가공면의 표면경도 특성

Fig. 17은 테이블 이송속도 5와 10m/min에서의 절입깊이에 따른 경도 값의 변화를 보여주고 있다. 양 쪽 이송속도 모두, 절입깊이가 증가함에 따라 경도 값이 상승하다가 절입깊이가 20㎛에 이르렀을 때 경도 값이 다시 떨어 졌다. 앞 절의 굽힘응력 값의 변화와 비교해 볼 때 그 경향이 상당히 비슷한 것을 알 수 있다. 이러한 결과의 원인은 절입깊이가 증가함으로써 가공시 열발생이 심해져 이것이 시편의 표면을 열경화 시켰으리라 본다.

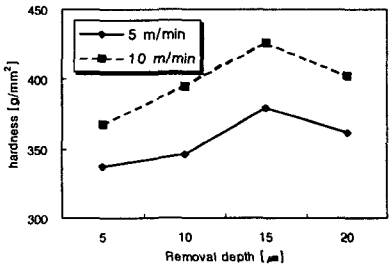


Fig. 17 Hardness(Hv) according to the change of removal depth

4. 결 론

열처리 공정에서 어닐링 및 용체화와 시효처리된 티타늄합금의 와이어 방전가공 및 연삭가공 후 열전계 방사형 전자현미경(SEM) 및 표면거칠기 측정장치를 이용하여 표면을 시각적 수치적으로 분석하였고, 경도측정기, 굽힘응력 시험기를 이용하여 각 조건에서의 시편의 기계적 성질을 비교. 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 티타늄합금을 황동선으로 와이어 방전가공하는 경우 거친가공(1st cut)에서 방전가공면에 Cu와 Zn 성분이 많이 함유되어 있는 현상을 확인할 수 있었으며, 이것은 표면거칠기 저하의 원인이 되며 상대적으로 낮은 경도값을 나타내고 있다.
2. 다듬질 방전가공(2nd cut)에서 Cu와 Zn 성분은 많이 없어지고 있음을 확인했고 , 따라서 표면거칠기 상태는 양호해졌다. 하지만 경도값은 커다란 변화를 나타내고 있지 않았다.
3. 다듬질 방전횟수가 증가할수록(3rd, 4th cut)방전가공면의 Cu 및 Zn의 양의 변화는 거의 없으나, 표면거칠기값은 더욱 향상되어 가고 있었다.
4. 연삭깊이와 이송속도가 증가함에 따라 표편거칠기는 나빠지는 경향을 보였다. 단, 이송속도가 10m/min일 때, 이송속도가 15m/min였을 때 보다 표면 거칠기가 나빴다. 이는 열전도율 매우 낮은 티타늄의 특성 때문으로 연삭열이 누적되어 시편에 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.
5. 테이블의 이송속도를 높이면 숫돌이 소재를 제때 제거하지 못 하여 시편이 숫돌에 밀려 물결모양을 형성하고, 그 물결문양의 간격은 이송속도의 증가에 따라 멀어진다. 절삭깊이를 깊이하면 재료가 가공방향으로 깊이 패이고 연소되기 쉽다.
6. 절입깊이가 증가할수록 굽힘응력은 증가한다. 연소가 발생한 부분의 경도는 그렇지 못한 부분보다 경도가 높았다. 절삭시 발생하는 열로 인해 시편이 경화된 것으로 추정된다.

참고문헌

(1) S. Banerjee, B. V. Prasad and P. K. Mishra, "Analysis of three-dimensional transient heat conduction for predicting wire erosion in the wire electrical discharge machining process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 65 pp. 134~142, 1997.

(2) G. Spur and J. Schonbeck, "Anode Erosion in Wire-EDM-A Theoretical Model", Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 253~256. 1993.

(3) Y. S. Liao, Y. Y. Chu and M. T. Yan, "Study of Wire Breaking Process and Monitoring of WEDM" Int. J. Mach. Manufact., Vol. 37, No. 4, pp. 555~567, 1997.

(4) Z. N. Guo, T. C. Lee, T. M. Yue and W. S. Lau, "A Study of Ultrasonic-aided Wire Electrical Discharge Machining", Journal of Materials Processing, Vol. 63, pp. 823~828, 1997.

(5) D. F. Dauw and L. Albert, "About the Evolution of Wire Tool Performance in Wire EDM", Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 22 1~225, 1992.

(6) Kumar, K. V., "Grinding titanium," Aerospace Engineering (Warrendale, Pennsylvania), Vol. 11, No. 9, pp. 17-19, 1991.

(7). Jingxin, R., Dingan, H., "Improvement of titanium alloy grindability," Journal of Northwestern Polytechnical University, Vol. 7, No. 4, pp. 355-363, 1989.

(8) Matyukha, P. D., Tsokur, V. P., "Efficiency of a diamond wheel in various methods of grinding titanium alloys," Soviet Journal of Superhard Materials, Vol. 10, No. 1, pp. 67-71, 1998.

(9) Sayutin, G. I., Tatarinov, A. P., "Selecting a wheel material for grinding titanium alloy," Soviet Engineering Research, Vol. 5, No. 7, pp. 75-77, 1985.