

티타늄합금의 와이어 방전가공과 후처리 연삭가공 특성

왕덕현*, 김원일+, 김종업**

(논문접수일 2002. 7. 25, 심사완료일 2002. 10. 10)

The Characteristics of Wire Electrical Discharge Machining and Final Surface Grinding for Titanium Alloy

Duck Hyun Wang*, Won Il Kim⁺, Jong Up Kim⁺⁺

Abstract

Titanium alloys have the characteristics of lightness, high strength and good corrosion resistant, and are broadly used in manufacturing parts for military and aerospace industries. These alloys are also recognized for organism materials comparatively and used as fixing ones in human body. Nevertheless titanium alloys have excellent properties, 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 conventional tools, so it is required nontraditional machining process. Finally, the mechanical characteristics such as surface roughness, shape and hardness were studied for wire electrical discharge machined and ground surfaces of titanium alloys for different heat-treated conditions.

Key Words : WEDM(와이어 방전가공), Surface grinding(연삭가공), Annealing(어니일링), Solution heat-treated(용체화처리)

1. 서론

티타늄합금은 가볍고 견고하면서도 내식성이 양호하기 때문에 새로운 구조용 재료로써 그 용도가 다양해지고 있다. 하지만 티타늄합금은 화학적으로 활성이 크기 때문에 공구마멸이 급속도로 진행되므로 절삭가공이 어렵다. 가능

한 절삭방법은 절입깊이를 아주 작게 하여 얇은 칩이 발생 할 수 있도록 하면 가능하나, 이 경우 칩이 연소하기 쉽다. 절삭속도를 빠르게 하면 절삭온도가 높아져 더욱 활성화되며, 또한 공구의 마멸이 보다 심해지므로, 일반 절삭가공보다는 와이어 방전가공과 연삭가공이 가능성이 있는 방법이다.

* 주저자, 경남대학교 기계자동화공학부(dhwang@kyungnam.ac.kr)
주소: 631-701 경남 마산시 월영동 449번지
+ 경남대학교 기계자동화공학부
++ 경남대학교 대학원 기계공학과 (현재 창원기능대학 컴퓨터응용기계과)

와이어 방전가공은 CNC기능화의 발달로 어느 기술에 못 지 않게 급속히 발전되어 왔으나 방전가공에 있어서 피해야 될 조건은 방전집중현상에 의한 아크방전현상이다⁽¹⁾. 현재 극간에 발생하고 있는 방전상태가 정상적인지 비정상적(아크방전)인지를 판단해서 만약 아크방전 상태라면 정상적인 방전이 되도록 어떤 일련의 조치를 취해야만 할 것이며, 이 경우 가공속도와 정밀도를 향상시키는 방법이 필요하다^(2,3). 티타늄 합금의 후처리 연삭가공에 관련된 연구로 티타늄의 연삭가공시 최적의 스톨과 가공조건 등을 제시하였다⁽⁴⁻⁶⁾. 스톨로는 탄화규소계인 GC스톨이 티타늄 합금의 가공시 적합하다고 말할 수 있다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 열처리조건으로 어니일링과 용체화처리(시효처리포함)를 한 티타늄합금을 와이어방전가공에서 가공조건들인 인가전압, 인가전류, 방전시간, 방전휴지시간 및 오프셋량 등을 변화시키면서, 또한 와이어가공 가공 반 복횟수를 증가시키면서 거친가공과 다듬질가공으로 가공실험을 수행하여 가공특성을 파악하고자 한다. 또한 방전가공 면을 후처리 마무리가공법으로 이송속도와 절입깊이를 변경하여 연삭가공한 후 연삭가공면의 표면거칠기, 연삭가공 면 조직의 미세구조 관찰 및 성분분석 경도 등의 기계적 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 실험재료

본 실험적 연구에는 와이어컷 방전가공기 (Daewoo A320D)와 수평축 평면연삭기(Youil Co.)를 사용하였다. 본 실험의 시편 재료는 티타늄합금으로서 Ti, Al(6%), V(4%) 이고 열처리 공정에서 어니일링과 용체화처리(시효처리 포함) 하였으며, 실온에서의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

티타늄합금의 풀립(annealing)처리는 조직의 안정화, 제품 치수의 안정화, 절삭성의 향상, 또는 기계적 성질의 향상을 위해서 실시하며, 용체화(solution)처리는 모든 원소를

Table 1 Mechanical properties of titanium alloy

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

가지대로 용해시켜 균일한 고용체를 형성한 후 상온까지 급랭하여 고온에서의 상태를 그대로 상온까지 연장하여 과포화 고용체를 형성시키는 방법이다.

또한 본 실험에 사용된 와이어 전극은 직경 0.25mm의 황동선 2종을 사용하였고, 연삭스톨은 외경(205)*폭(19)*내경(50.8)인 GC60K7V를 사용하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 시편을 치구에 고정하고 테이블에 X축 방향으로 장착하여 가로, 세로 각각 6등분하여 원래의 가공소재 $\phi 40 \times 60\text{mm}$ 을 4mm의 정방형으로 방전가공을 수행하였다.

가공방법은 거친가공(1차), 다듬질가공(2차, 3차, 4차)의 개념으로, 가공회수를 1차에서 4차까지로 하였으며, 각 횟수별로 가공조건을 변경하여 최적의 데이터를 얻고자 하였다.

본 실험에서 선택한 방전조건은 방전에너지에 직접적인 영향을 미치는 방전펄스시간, 휴지시간, 전류피크치(Ip: Peak value current) 등의 값을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 가공조건은 C441 ~ C683로 사용자 정의 기능을 사용하여 입력한 후 프로그램에서 호출하여 사용하였으며, 와이어 이송속도는 10m/min, 와이어 장력은 0.8kgf에 고정하였고, 가공 조건표는 Table 2와 같다.

와이어 방전가공 후 각 시편들을 주사전자현미경으로 금속표면의 조직 및 형상을 관찰하였으며, 표면거칠기를 측정하였다. 또한 와이어 방전가공한 시편을 평면연삭가공하여 그 특성을 방전가공과 비교연구하였으며 또한 경도값들을 구하였다.

Table 2 Wire EDM conditions

Number of EDM	Machining condition	Offset (mm)	Voltage (V)	Current (A)	Feedrate (mm/min)
1st	C441	0.225	31	15.2	3.7
2nd	C623	0.150	60	1.5	5.5
3rd	C653	0.135	65	1.1	9.5
4th	C683	0.133	30	0.7	9.5

3. 실험결과 및 고찰

3.1 방전가공면과 연삭가공면 형상 특성

Fig. 1과 2는 각각 어니일링한 경우와 용체화처리(시효처

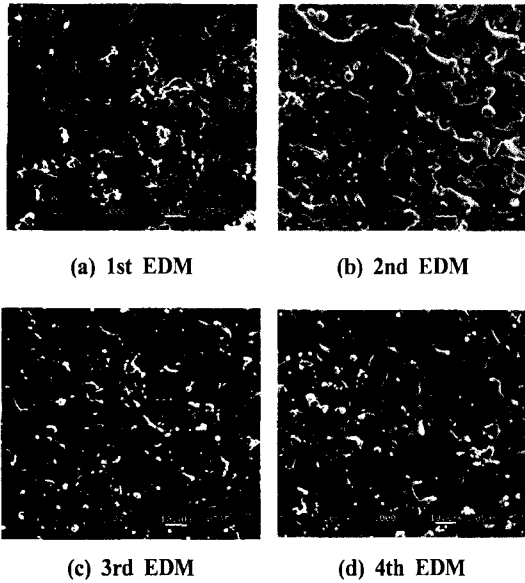


Fig. 1 SEM micrographs of EDMed surface for annealed titanium alloy (x1000)

리 포함)한 경우 티타늄합금을 방전횟수별로 가공한 경우 주사전자현미경으로 관찰한 결과로, 방전가공 횟수에 따라 (a)1차(거친방전), (b)2차(이후 다듬질방전), (c)3차 및 (d)4차 방전가공면의 사진들이다. Fig 1(a)와 2(a)에서 보는 것처럼 거친 방전가공면은 와이어 성분의 용착 현상이 두드러져 나타나고 있으나, 방전횟수가 증가할수록 이러한 현상은 많이 줄어들고 있어 표면형상이 향상되고 있었다.

Table 3과 4는 각각 어니일링과 용체화 처리한 티타늄합금의 EDX 분석한 결과로 방전표면의 남아있는 성분들을 무게 중량으로 나타낸 것이다. 원래 소재에 포함된 성분 Ti, Al(6%), V(4%) 이외에 Fig. 3에 나타난 것처럼 어니일링

Table 3 Element weight percentage of EDMed surface by EDX analysis for annealed titanium alloy

Element(%) \ No. of EDM	1st	2nd	3rd	4th
Al	4.44	4.52	5.17	5.23
Ti	61.34	62.49	63.86	66.52
V	4.91	5.01	4.71	4.78
Cu	18.91	17.30	17.37	15.18
Zn	10.4	10.68	8.89	8.29

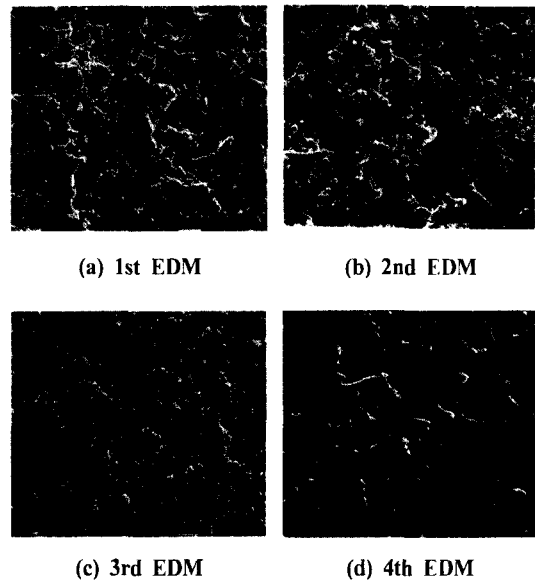


Fig. 2 SEM micrographs of EDMed surface for solution treated titanium alloy(x500)

처리한 경우 와이어 성분인 Cu와 Zn가 거친방전가공(1차)된 면에 존재하며 다듬질가공(2, 3 및 4차)에서도 Cu와 Zn 성분이 줄어들지 않고 있었다. Fig. 4에 나타난 것처럼 용체화처리한 경우 2차가공부터 Cu와 Zn의 무게중량이 현저히 감소하고 있었다. 용체화처리(시효처리 포함)를 한 경우가 다듬질 방전가공을 하면 모재의 성분에 더 근접하여 간다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 용체화처리한 Ti-6Al-4V 합금을 테이블 이송속도 15m/min, 절입깊이 15 μ m의 조건으로 연삭가공한 면들을 주사전자현미경으로 얻은 사진들이다. Fig. 5(a)는 배율을 100배로 하여 얻은 사진이고, Fig. 5(b)는 (a)의 원형 부

Table 4 Element weight percentage of EDMed surface by EDX analysis for solution heat-treated titanium alloy

Element(%) \ No. of EDM	1st	2nd	3rd	4th
Al	3.91	5.21	4.20	7.02
Ti	68.58	79.22	80.44	78.27
V	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

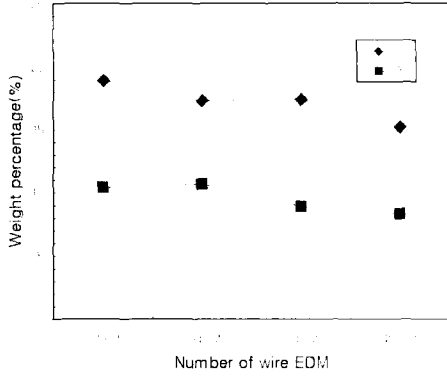


Fig. 3 Change of wire component(Cu & Zn) according to the number of EDM for annealed titanium alloy

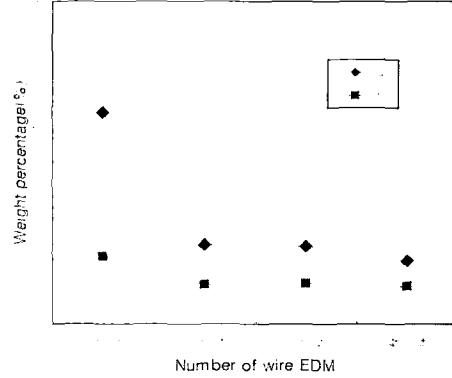
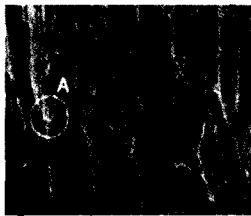
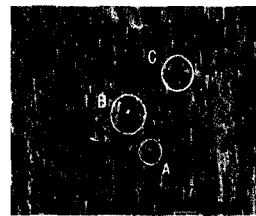


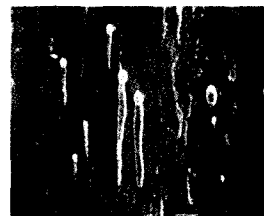
Fig. 4 Change of wire component(Cu & Zn) according to the number of EDM for solution heat-treated titanium alloy



(a) SEM micrograph (x100)



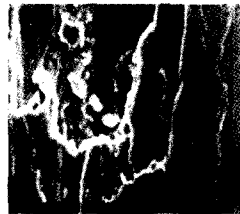
(a) SEM micrograph (x100)



(b) Area A (x1000)



(b) Area A (x500)



(c) Area A (x1500)



(c) Area B (x2000)



(d) Area C (x4000)

Fig. 5 SEM micrographs of ground surface at table speed 15m/min, cutting depth 15 μ m

Fig. 6 SEM micrographs of ground surface at table speed 5m/min and cutting depth 20 μ m

분인 A부분을 배율 500배로 확대한 것이다. Fig. 5(c)는 그 부분을 1500배의 배율로 확대하여 얻은 사진이다. 이 그림들을 보면 시편의 표피 부분이 계단식으로 차곡차곡 쌓여서 이루어진 것을 볼 수 있다. 이는 연삭시 연삭연소에 의하여 일부분이 용융되다가 재용착된 부분으로 생각된다.

Fig. 6은 용체화처리한 Ti-6Al-4V 합금을 테이블 이송속도 5m/min, 절입깊이 20 μ m의 조건으로 연삭가공한 것을 주사전자현미경으로 얻은 사진들이다. 연삭깊이가 더욱 증

가하여 Fig. 6(a)와 같이 연소가 일어나고 있으며 이 부분을 배율 100배로 확대한 모습이다. Fig. 6(b)는 (a)의 원형 A부분을 배율 1000배로 확대한 사진이며, 연소로 인해 용융된 모습이 현저히 나타나고 있다고 생각된다. Fig. 6(c)는 6(a)의 원형 B부분을 2000배의 배율로 확대한 것으로써 연삭유의 영향으로 생각된다. Fig. 6(d)는 6(a)의 원형 C부분을 4000배의 배율로 확대한 것으로 연삭 슛돌 입자로 생각된다.

3.2 방전가공면과 연삭가공면 표면거칠기 특성

Fig. 7과 8은 각각 어니일링처리와 용체화처리한 시편을 와이어 방전가공하여 얻은 방전면을 피삭재 중심부에서 테이블 이동방향(L)과 그의 수직방향(T)에서 8번씩 측정된 중심선평균거칠기의 평균값들이다. 거친방전(1st cut)과 처음 다듬질 방전(2nd cut)에서는 중심선평균거칠기값이 큰 변화가 없으나 다듬질 방전이 증가할수록(2nd, 3rd, 4th cuts) 중심선평균거칠기는 크게 줄어들어 양호한 표면을 나타내고 있다. 이 경우 연삭방향에서 측정한 결과가 연삭직교방향에서 측정한 결과보다 표면거칠기가 나쁘게 나타나고 있다. 이러한 결과는 실험소재의 가공시 테이블의 이송방향보다 와이어가 이송되는 방향의 표면거칠기 값이 양호하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9과 10은 어니일링 열처리한 시편의 와이어 방전가공면에서 피삭재 표면에 존재하는 Cu와 Zn성분을 제거하기 위해서 또한 보다 양호한 표면을 얻기 위해서 각 면을 연삭가공한 시편의 표면 거칠기를 측정한 결과이다. Fig. 9는 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 μ m 이하와 15 μ m 이상에서의 표면거칠기 값이 뚜렷한 차이를 나타낸다. 원인은 티타늄은 열전도율이 매우 낮은 금속이므로 가공시 열이 가공부에 축적되어 가공성을

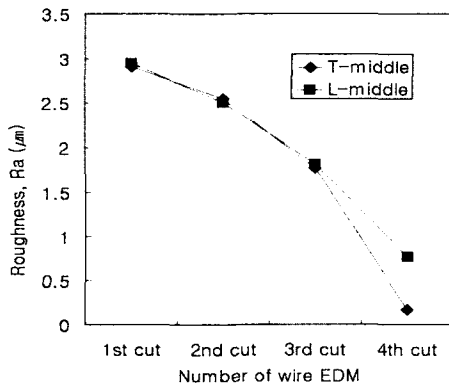


Fig. 7 Surface roughness(Ra) of wire EDMed surface for annealed titanium alloy

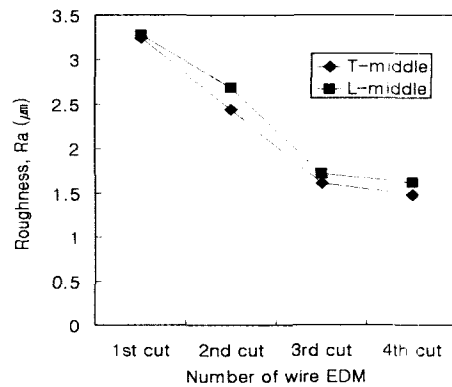


Fig. 8 Surface roughness(Ra) of wire EDMed surface for solution heat-treated titanium alloy

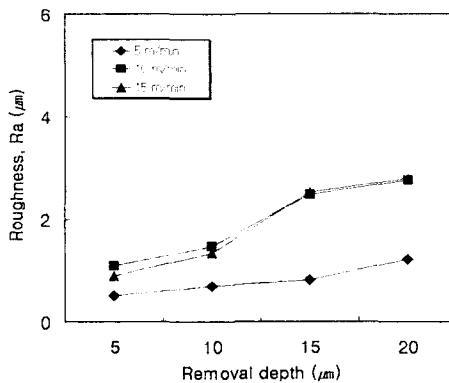


Fig. 9 Surface roughness(Ra) along the grinding direction

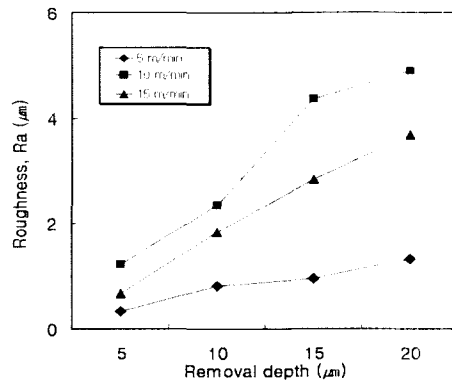


Fig. 10 Surface roughness(Ra) perpendicular to the grinding direction

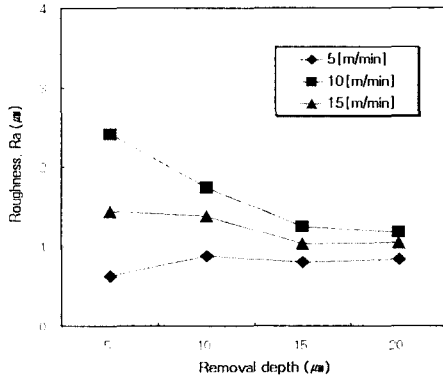


Fig. 11 Surface roughness(Ra) along the grinding direction

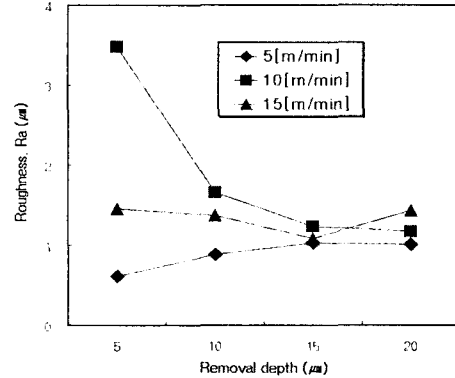


Fig. 12 Surface roughness(Ra) perpendicular to the grinding direction

저하시키는 것으로 생각된다. 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 생각된다.

Fig. 10은 가공방향에 수직인 방향으로의 중심선 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 테이블 내에서의 전반적인 경향은 Fig. 9와 같이 테이블 이송속도와 절입깊이가 증가할수록 표면이 나빠지는 것을 보여주고 있지만, 표면 거칠기 값의 차이가 커지면서 가공특성을 좀더 명확히 보여주고 있다. Fig.9의 가공방향으로의 거칠기와 비교하면 이송속도 10m/min에서 테이블 이송속도 15m/min 보다 더 표면이 거칠어짐을 알 수 있다. 이 역시, 열의 누적으로 인한 연소 현상의 결과로 보이며, 특히, 절입깊이가 10에서 15μm으로 증가할 때 표면이 심하게 거칠어진다.

용체화 처리(시효처리 포함)한 Ti-2Al-4V 합금을 테이블 이송속도와 절입깊이를 변화시키면서 연삭가공한 뒤 얻은 표면거칠기값을 Fig. 11과 12에 비교하여 나타내었다. 먼저, Fig. 11은 가공방향의 중심선 평균거칠기값을 각각의 테이블 이송속도에 따라 비교한 것이다. 테이블 이송속도 5m/min에서는 절입깊이의 변화에 따른 표면거칠기의 변화는 거의 없었다. 먼저 설명한 것과 같이 이송속도가 10m/min인 경우가 15m/min인 경우보다 표면거칠기가 나빠져 나타나고 있었다. 테이블 이송속도 10과 15m/min에서는 절입깊이가 깊어질수록 표면이 양호해지고 있었다.

Fig. 12는 가공방향에 수직인 방향의 중심선 평균거칠기를 나타내고 있다. 전체적 경향이나 표면 거칠기값은 가공

방향에서의 것과 비슷한 결과를 나타내었다. 단, 절입깊이 5μm이고 테이블 이송속도가 10m/min일 때의 거칠기 값은 가공방향에서 보다 1μm정도 높게 나타났다.

3.3 방전가공면과 연삭가공면 표면경도 특성

Fig. 13은 와이어 방전가공면들의 표면경도를 마이크로 비커스경도기로 적용하중 1Kg으로 시편의 중앙(inside)과 바깥(outside)부분을 10번씩 측정된 결과를 평균값으로 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. 14은 어닐링된 Ti-6Al-4V 합금의 테이블 이송속도 5와 10m/min에서의 절입깊이로 연삭가공한 경우 경도값의 변화를 보여주고 있다. 방전가공한 면보다 경도값은 증가하고 있으며, 이것은 잔존하고 있는 Cu나 Zn 성분이 제거되기 때문인 것으로 생각된다. 양 쪽 이송속도 모두, 절입깊이가 증가함에 따라 경도 값이 상승하다가 절입깊이가 20μm에 이르렀을 때 경도 값이 다시 떨어졌다. 앞 절의 굽힘응력 값의 변화와 비교해 볼 때 그 경향이 상당히 비슷한 것을 알 수 있다.

4. 결론

열처리 공정에서 어닐링과 용체화(시효처리포함)처리된 티타늄합금의 와이어 방전가공 및 후처리 연삭가공 후 주사전자현미경(SEM) 및 표면거칠기 측정장치를 이용하여 표면형태를 분석하였고, 미세경도 및 굽힘응력을 측정하여

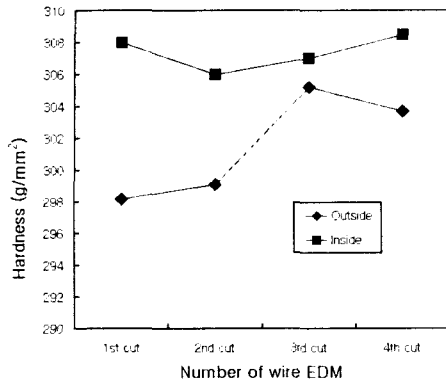


Fig. 13 Hardness(Hv) for number of wire EDM

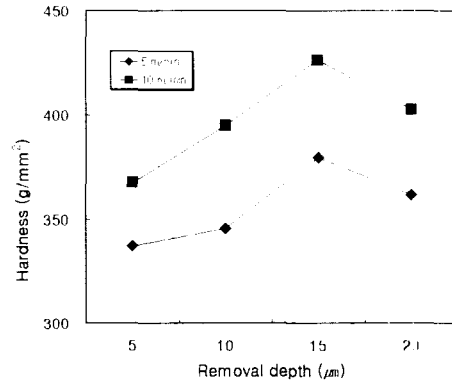


Fig. 14 Hardness(Hv) according to the change of removal depth

연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 거친가공(1st cut)에서 방전가공면에 와이어 성분인 Cu와 Zn 성분이 많이 함유되어 있었으며, 다듬질 방전가공인 2차에서 3차, 4차로 진행할수록 Cu와 Zn 성분은 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 특히 용체화 처리한 시편이 2차가공부터 와이어 성분이 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 상되어 가고 있었다.
- (2) 후처리로 연삭가공한 경우 중심선평균거칠기값은 용체화처리한 시편의 경우가 절입깊이와 이송속도가 증가할수록 양호한 표면을 나타내고 있었다.
- (3) 후처리로 연삭가공한 경우 어니일링한 시편들은 연삭 깊이와 이송속도가 증가함에 따라 표면거칠기는 나빠지는 경향을 보였내고 있으나, 용체화한 경우는 오히려 좋아지는 경향을 나타내고 있었다. 이것은 표면에 나타나는 연삭연소의 영향을 사료된다.
- (4) 후처리 연삭가공후 미세경도값은 와이어 방전가공한 경우보다 증가하므로 후처리 가능성이 필요한 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 2002학년도 경남대학교 학술논문게재연구비 지원으로 이루어졌음.

참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) D. F. Dauw and L. Albert, "About the Evolution of Wire Tool Performance in Wire EDM", Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 221~225, 1992.
- (4) Kumar, K. V., "Grinding titanium," Aerospace Engineering (Warrendale, Pennsylvania), Vol. 11, No. 9, pp. 17~19, 1991.
- (5) Jingxin, R., Dingan, H., "Improvement of titanium alloy grindability," Journal of Northwestern Polytechnical University, Vol. 7, No. 4, pp. 355~363, 1989.
- (6) 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.
- (7) 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.