

## 티타늄합금의 와이어 방전가공시 방전가공 조건의 영향

### *Effect of EDM Conditions when Wire-EDM for Titanium Alloy*

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

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

#### **Abstract**

Titanium alloy conducted in this experimental study has superior corrosive resistant and is mainly used in aerospace, automotive and petro-chemical industries. It is also treated with important materials of domestic goods due to improvement of the standard of living. In this study specimens were processed in the wire EDM after annealing, solution treatment and aging. Results were obtained through repeated experiments of main rough process and finish process with the change of process parameters. Processing characteristics such as surface hardness, surfaces roughness, shape of processed surface and components were measured. The results confirmed that the above mentioned elements were improved in accordance with the number of process. Therefore, the optimal wire EDM condition in accord with processing characteristics is proposed in this experiment.

**Key Words** : Titanium Alloy(티타늄 합금), EDM (Electric Discharge Machining : 방전가공), Annealing(풀립), Solution treatment(용체화처리), Aging(시효처리), Surface hardness(표면경도), Surface roughness(표면거칠기), Shape of processed surface and components(가공면 형상 및 금속 성분)

#### **1. 서론**

티타늄합금은 가볍고 견고하면서도 내식성이 양호하기 때문에 항공우주, 석유화학장치 산업 등에 주로 이용되었으며, 산업의 발전과 더불어 생활수준의 향상으로 환경, 스포츠 및 레저에 대한 관심이 높아지면서 티타늄을 기존의 군수용이나 항공우주산업에서부터 민수용으로 활용하고자 각종 제품 개발이 활기를 띠고 있다. 그 예로 건축, 토목, 자동차, 생체의료 부품 등에 이르기까지 다양한 용도로의 적용이 시도되고 있다. 최근에는 티타늄 소재를 이용한 의료용 부품, 추체간 고정기기 및 인공고관절용 부품, 안경테, 손목시계, 골프용품 등은 티타늄의 우수한 생체적합성과 더불어 경량·고강도 특성을 지니고 있기 때문이다. 티타늄합금은 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 절삭 온도가 높아져 티타늄이 더욱 활성화되며, 또한 공구의 마멸이 보다 심해진다<sup>1,2)</sup>.

전자소자와 CNC기능화의 발달로 현재의 방전가공기와 이에 따른 가공기술은 어느 기술에 못지 않게 급속히 발전하여 왔다. 최근에는 방전가공기가 없는 금형산업은 생각할 수 없을 정도로 필수 불가결한 장비가 되었고, 또 보편화되었다. 방전가공기의 생명은 가공속도와 가공정밀도이며 방전가공기 제조업체들은 각각 독자적인 방전제

어회로를 내장한 전원장치를 생산하고 있다.

가공속도와 정밀도를 결정하는 요소는 대개 가공조건, 방전액, 전극의 재질, 방전액 처리에 의한 분류를 들 수 있으나 이와 같은 것은 이미 결정된 전원장치에서 사용자가 선택하는 것들이다. 가공조건이란 방전제어회로에 내장되어 있는 기능 중 가공속도와 정밀도를 결정하는 요소를 사용자가 선택하도록 한 것이다.

방전가공에 있어서 피해야 될 부분은 방전집중현상에 의한 아크방전이다<sup>3)</sup>. 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.<sup>4,5)</sup> 와이어방전가공에 관한 연구는 극히 저조한 편이다.<sup>6,7)</sup>

본 연구에서는 티타늄합금을 열처리 공정에서 어니일링 및 용체화 와 시효처리를 하여 와이어 방전가공에서 가공조건들인 인가전압, 인가전류, 방전시간, 방전 휴지시간, 및 오프셋량 등을 변화시키면서 와이어가공횟수를 1차, 2차, 3차, 4차, 5차, 6차로 증가시키면서 실험을 수행하였다. 위와 같이 열처리된 티타늄합금의 가공시 가공조건에 변화를 주었을 때 가공특성에 어떠한 변화가 나타나는지를 규명하고 최적의 와이어방전 가공조건을 제시하고자 한다.

## 2. 관련이론

방전이 분산되어 가공이 행해질 경우에는 방전 후에 절연회복이 되고, 무부하전압이 극간에 존재하는 시간  $\tau_n$  이 존재한다. 그러나 방전이 집중할 때는 Fig. 1 의 4, 5와 같이  $\tau_n$ 가 발생하지 않는 상태가 연속으로 발생하게 된다. 이것은 극간의 절연회복이 없는 상태에서 방전전류가 흐르고 있음을 의미하지만 방전의 발생점이 한 곳에 집중 될 가능성이 높음을 보여준다.

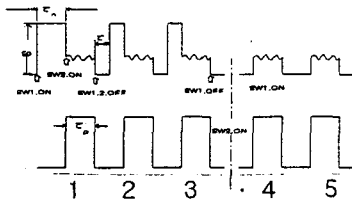


Fig. 1 Waveform of voltage and current

Fig. 2는 방전가공시 순차적인 전기흐름을 나타낸 모형도이다. 트랜지스터 스위칭회로에 의하면, 스위칭소자(switching 素子)가 있는 트랜지스터를 SW1, 방전간격을 SW2로 하자. 또한, SW1이 ON되면, 극간에 전원전압  $E_0$ 가 인가된다. 그러나 방전간격은 이 상태에서는 절연되어 있어서 전류가 흐르지 않는다. 절연파괴에 의해 방전이 발생하기까지는 전압이 더해진 상태로 지연된다. 여기서 극간 거리가 좁혀지면 극간에 산재되어 있는 가공칩(加工粉) 등이 극간의 전위경도가 높은 곳(막판 전압 극간 거리가 큰 곳, 좁은곳)에 집중하여 절연파괴 전압에 이르면, SW2가 ON된 상태로 된다.

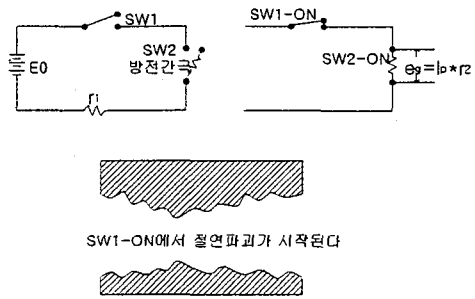


Fig. 2 Circuit of electrical discharge

SW1에서 SW2-ON까지의 시간이  $\tau_n$  이다. SW2-ON에서 방전전류  $I_p$  가 흐르지만 극간에는 극간의 저항  $r_2$  로  $I_p$  의 전류가 흐르기 때문에 오옴(Ohm)의 법칙  $E=I \cdot R$ 에 의해 전압 강하  $e_g$  가 생긴다.

$$e_g = I_p \cdot r_2 \quad (1)$$

$e_g$ 는 대개 일정하며 동과 강의 경우 17-25V, 그라파이트와 강의 조합의 경우 20-33V를 나타내는데 이것을 아아크전압이라고 부른다.  $I_p$ 의 계산은

$$I_p = (E_0 - e_g) / r_1 \quad (2)$$

그리고  $I_p$ 가 흐르고 난 후 어느정도 시간이 경과하고 SW1을 OFF로 하면 전류는 0으로 되고 SW2도 자연히 OFF된다. 휴지시간  $\tau_r$  이 경과하고 다시 SW1이 ON이 되므로 연속방전이 발생할 수가 있게 된다. 특정한 곳에 가공칩이나 기름의 분해물이 축적되면, SW1은 OFF로 되어 도 SW2는 OFF로 되지 않는 특이한 상태가 된

다. 휴지시간  $\tau_r$  을 경과해도 SW2가 OFF로 되지 않을 때에는, 무부하전압의 지연이 생기지 않는 만큼 전류가 흐르게 된다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치 및 실험재료

본 실험에 사용한 와이어 컷 방전가공기는 DAEWOO A320D(Sodic EX21)로 Fig. 3 과 같으며, 측정장치는 Table 1에 나타내었다. 본 실험에 사용한 재료는 티타늄합금으로서 Ti, Al(6%), V(4%) 이고 열처리 공정에서 Annealing 및 용체화와 시효처리 하였으며, 소재는  $\phi 40 \times 60$ 을 4mm 정방형으로 가공하였다. 이 소재의 실온에서의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 또한 본 실험에 사용된 와이어 전극은  $\phi 0.25\text{mm}$ 의 황동선 2종을 사용하였다.

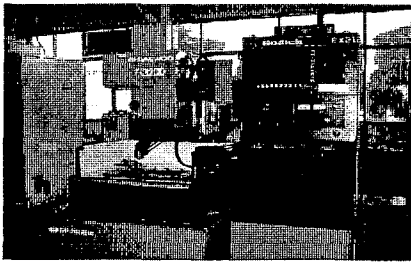


Fig. 3 Wire EDM

Table 1 Experimental instrument

Item	Instrument
Surface roughness	Surftest-501, Mitutoyo (Japan)
SEM, EDX	Topcon (Japan)
Hardness	Microhardness tester MXT- $\alpha$

Table 2 Mechanical property of Ti alloy

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

#### 3.2 실험방법

본 실험에서 선택한 방전조건은 일본의 Sodic

사에서 제시한 실험조건을 활용하였으며, 방전에너지에 직접적인 영향을 미치는 방전펄스시간 (On time), 휴지시간(Off time), 주 전원피크치( $I_p$ : 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 0.8kgf에 고정하였고, 가공 조건표는 Table 3과 같다.

Table 3 Wire EDM condition

Plate thickness	Machining Con.	Offset No.	Voltage (V)	Current (A)	F 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
	5th	C683	H133	30	0.7	9.0 - 10.0
	6th	C683	H133	30	0.7	9.0 - 10.0

실험소재인 티타늄합금을 열처리 공정을 이용하여 조직을 변화시켰으며, 가공소재  $\phi 40 \times 60\text{mm}$ 을 와이어 컷 방전가공기의 테이블에 X축 방향으로 장착하여, Fig. 4와 같이 가로, 세로 각각 6등분하여 4mm의 정방형으로 가공하였다.

가공방법은 거친가공(1st cut), 다듬가공(2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th cuts)의 개념으로 1 ~ 6회로 하였으며, 각 횟수별로 가공조건을 변경하여 최적의 데이터를 찾고자 노력하였다.

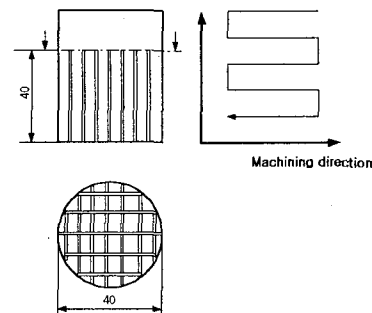


Fig. 4 Workpiece configuration and machining direction

와이어 방전가공 후 각 시편들을 표면거칠기측정기, 주사전자현미경, 에너지 분산형 조성분석

기, 경도측정기를 이용하여 표면거칠기와 금속표면의 조직 및 경도값 등의 가공특성을 연구하였다. 표면거칠기는 10 $\mu$ m간격으로 cutoff 길이 0.8mm를 기준으로 중심선평균거칠기(Ra)와 최대높이표면거칠기(Rmax)로 나타내었다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 방전 가공면의 표면경도 특성

Fig. 5는 와이어 방전가공면들의 표면경도를 마이크로 비커스경도기로 5번씩 측정된 결과를 평균값과 최대 및 최소 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.

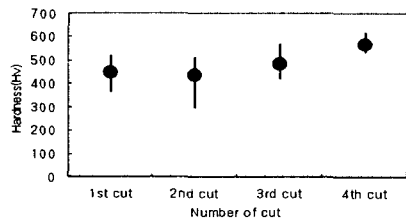
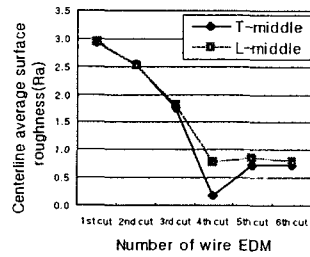


Fig. 5 Hardness(Hv) for number of wire EDM

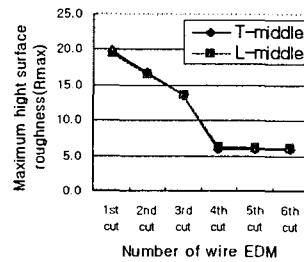
##### 4.2 방전 가공면의 표면거칠기 특성

Fig. 6과 7은 실험재료별로 와이어 방전가공된 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 측정된 결과가 transverse 방향에서 측정된 결과보다 표면거칠기가 나쁘게 나타나고 있다.

이러한 결과는 실험소재의 가공 시 테이블의 이송 방향보다 와이어가 이송되는 방향의 표면거칠기 값이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

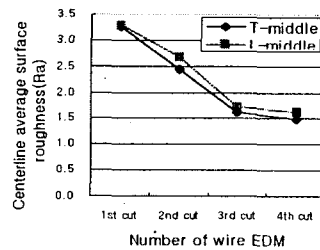


(a) Centerline average surface roughness (Ra)

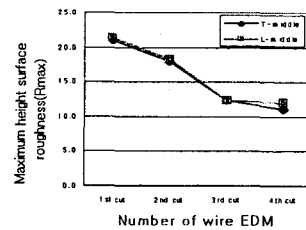


(b) Maximum height surface roughness (Rmax)

Fig. 6 Surface roughness for number of wire EDM (Annealing heat-treated Ti-alloy)



(a) Centerline average surface roughness (Ra)



(b) Maximum height surface roughness (Rmax)

Fig. 7 Surface roughness for number of wire EDM (Solution heat-treated Ti-alloy)

### 4.3 방전가공면의 형상 특성

Fig. 8과 9는 주사전자현미경으로 와이어 방전가공면을 관찰한 결과로, 각각의 (a), (b), (c) 및 (d)는 각각 방전횟수에 따라 1st, 2nd, 3rd 및 4th 방전면의 사진들이다. Fig 8, 9의 (a)에서 보는 것처럼 와이어 방전가공면은 와이어의 용착 현상이 두드러져 나타내고 있으며, 이에 따라 표면거칠기가 큰값을 나타내고 있다. 방전횟수가 증가할수록 이러한 현상은 많이 줄어들고 있어 표면형상이 향상되고 있었다.

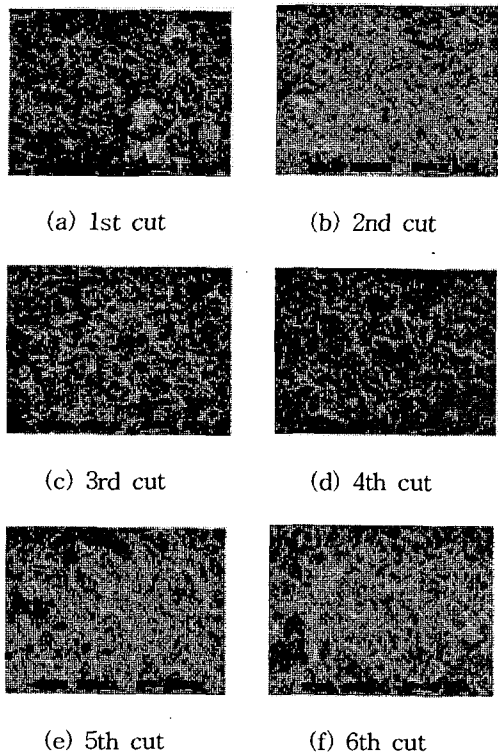


Fig. 8 SEM micrographs of EDMed surface (Annealing heat-treated Ti-alloy)

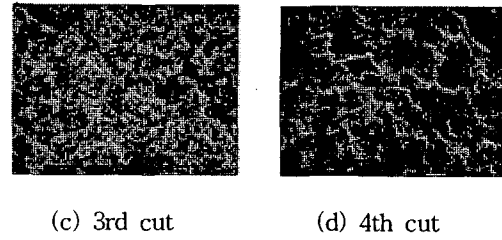
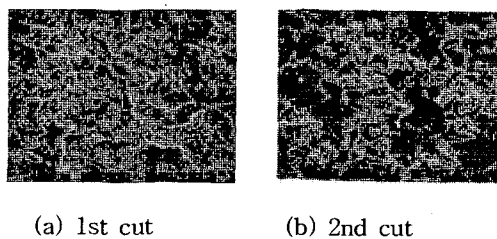


Fig. 9 SEM micrographs of EDMed surface (Solution heat-treated Ti-alloy)

Table 4와 5는 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. Fig. 10과 11에 Cu와 Zn의 성분 변화를 방전가공 횟수에 따라 나타내었다.

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

# of cut Element	1st cut	2nd cut	3rd cut	4th cut	5th cut	6th cut
Al	4.44	4.52	4.25	3.82	5.17	5.23
Ti	61.34	62.49	61.86	63.43	65.25	65.69
V	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

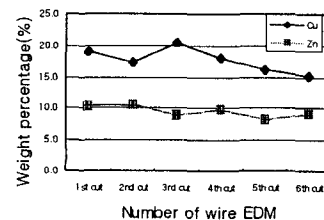


Fig. 10 Weight percentage of Cu and Zn versus number of wire EDM

Table 5 Element weight percentage of EDMed surface by EDX analysis (Solution heat-treated Ti-alloy)

# of cut Element	1st cut	2nd cut	3rd cut	4th cut
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

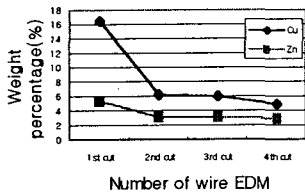


Fig. 11 Weight percentage of Cu and Zn versus number of wire EDM

### 5. 결론

열처리 공정에서 어닐링 및 용체화와 시효처리된 티타늄합금의 와이어 방전가공시 가공 횟수 (1st cut ~ 4th cut) 별로 가공조건을 달리하여 가공된 면의 경도, 표면거칠기 및 표면형상을 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) 다듬질가공(2nd cut)에서 Cu와 Zn 성분은 많이 없어지고 있음을 확인했고, 따라서 표면거칠기 상태는 양호해졌다. 하지만 경도값은 커다란 변화를 나타내고 있지 않았다.
- (3) 다듬질 횟수가 증가할수록(3rd, 4th cut) 방전가공면의 Cu 및 Zn의 양의 변화는 거의 없으나, 표면거칠기값은 더욱 향상되어 가고 있었다.

### 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. 221~225, 1992.
- (6) 김창호, "초경합금의 와이어방전가공 가공성 및 표면특성", *한국정밀공학회지*, Vol. 16, No. 8, pp. 100~105, 1999
- (7) 김원일, 허성중, 이재명, "STD-11 합금공구강과 P-20 초경합금재의 WEDM 특성에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, Vol. 13, No. 1, pp. 22~28, 1996.