

## 냉간 금형용 공구강의 Cu 전극을 이용한 방전 홀에 관한 연구

박인수\*, 이은주\*, 김화정\*, 왕덕현\*\*,#

\*한국폴리텍대학 창원캠퍼스, \*\*경남대학교 기계공학부

### Electron Discharge Machining (EDM) and Hole EDM of Cold Heat-treated Tool Steel Molds (STD11) by using Cu Electrodes

In-Soo Park\*, Eun-Ju Lee\*, Hwa-Jeong Kim\*, Deok-Hyun Wang\*\*,#

\*Changwon Campus of KOREA POLYTECHNIC., \*\* School of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.,

(Received 28 March 2018; received in revised form 14 May 2018; accepted 23 May 2018)

#### ABSTRACT

3D formed Electrical Discharge Machining (EDM) and hole EDM were conducted for die and mold manufacturing with electrodes which were made by mechanical machining and wire EDM. It is difficult to machine the hardened material after heat treatment and quenching with traditional machining. The only method of machining hardened material is die-sinking EDM. In this research, hole EDM was conducted for heat-treated cold-worked tool steel (SKD11) for use as a die material. The EDM surfaces were analyzed by pulse-on time and peak current of EDM current, according to the machining conditions of EDM. The EDM surface profiles were affected by the peak current. The contribution of each factor is peak current (91.63%) and pulse-on time (0.93%). The best surface roughness was obtained with a 130  $\mu$ s pulse-on time and a 14.2 A peak current. With uniform EDM processing, the surface deteriorated with increasing pulse-on time and peak current. The thickness of the solidified layer induced by EDM was increased as the peak current, crater shapes, and erupted shapes of EDM surfaces were increased. Therefore, microcracking gaps induced by surface tension were increased.

**Key Words** : EDM(방전가공), EDM Hole(방전 홀), Design of Experiments(실험계획법)

### 1. 서 론

방전가공은 공구전극과 공작물 사이에 전기에너지 를 이용한 스파크를 발생시켜 이때 발생한 열에 의해 고온에서 가공하는 특수 가공법이다<sup>[1,2]</sup>. 방전가공은 공작물이 전기적으로 전도체이기만 하면 기존 절삭가

공으로 가공이 힘든 고경도 합금, 초경합금, 고강도 합금 그리고 열처리 후의 소재도 가공이 가능하다는 장점이 있다.<sup>[3]</sup> 또한 공구전극과 공작물간의 물리적인 접촉이 발생하지 않아 가공장비나 공구의 강성도가 가공정밀도에 영향을 주지 않는다. 공구전극을 가공할 수 있는 한 기계가공이 어려운 불규칙한 형상의 가공물 도 쉽게 가공할 수 있고, 미세한 구멍이나 홈 등의 가공도 쉽게 할 수 있는 장점이 있다<sup>[4]</sup>.

# Corresponding Author : [dhwang@kyungnam.ac.kr](mailto:dhwang@kyungnam.ac.kr)

Tel: +82-55-249-2712, Fax: +82-55-999-2160

오늘날까지 방전가공기술은 발달을 거듭하며 제조 산업에 폭넓게 보급 되어 왔다. 그동안 방전가공원리에 대한 몇 가지 가설들이 주장되고 또한 방전가공조건에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 다양한 연구들이 방전가공기술 분야를 발전시키고 있다.

정립된 이론에 의하면 EDM 공정 중에는 절연체 파괴, 플라즈마 형성, 그리고 탈이온 회복과정 등의 몇 가지 단계를 거쳐서 가공이 성립되는 것으로 알려져 왔다.<sup>[5,6,7,8]</sup> 최근 방전가공 관련 연구는 마이크로 크기의 가공과 방전 최적화 관련 연구들이 많이 이루어지고 있다. Krishna<sup>[9]</sup>는 전도성을 가진 SiC를 마이크로 방전할 때 갭 전압, 정전용량, 임계값과 같은 매개변수의 영향을 다구찌 기법과 분산분석법에 의해 실험한 후 분석하였고 Kwon<sup>[10]</sup>도 마이크로 구멍 가공 중 생산성을 최대화를 위해 다구찌 기법 등을 사용하였다. Lee<sup>[11]</sup>는 홀 관통 순간을 평가하는 방법을 제시하는 연구를 하였으며 Kumar<sup>[12]</sup>은 다구찌 방법을 이용하여 알루미늄 합금 방전 가공시 소재제거율(material removal rate), 전극소모량(electrode wear rate)에 대한 연구를 하였다. Ferreira<sup>[13]</sup>는 동 텅스텐 전극을 사용하여 헬리컬 나선 캐비티 마무리 표면형상에 관한 연구하였으며 Kim<sup>[14]</sup>은 가공 부스러기의 효율적 배출을 위해 전극형상을 스크류 형상을 이용하는 연구를 하였다.

금형방전가공에서는 기계가공 또는 와이어 가공 등으로 미리 형성된 전극을 이용하여 3차원 형상가공과 함께 많은 수의 홀 가공이 이루어지고 있다. 특히 금형제작에서 열처리 후의 공작물의 홀 가공은 재료의 높아진 경도로 인해 기존의 기계적 방식으론 가공이 불가능하게 된다. 이러한 경우에 경도가 높아진 재료의 홀 가공 방법의 한가지로 전극을 이용한 형조방전가공이다. 현재 방전 홀 가공은 산업현장에서 공정설계자나 작업담당자의 자의적인 판단과 경험적 해답에 의해 방전 홀의 가공이 이루어지고 있다

본 연구에서는 금형제품에 널리 사용되는 열처리된 냉간금형용 공구강(STD11)을 소재로 방전 홀 가공을 실시하였다. 방전전류의 펄스지속시간(pulse-on time)과 최대 전류치(peak current)라는 전기적 가공조건을 변화시켜 이에 따른 공작물의 표면형상을 관찰 분석하였다. 이러한 과정을 통해 최적의 가공조건을 정립하여 공작물의 정밀도를 향상하고자 함이 연구의 목적이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig 1은 본 연구에서 사용한 장비( Beijing agic charmilles actspark sp-3)의 개요도를 나타내고 있다. 형조방전기의 기본구조는 가공 액 공급 장치, 몸체, 그리고 전원장치로 구성되어 있다.

### 2.2 시편

본 연구에 사용한 전극은 순수 Cu로 준비하였다. 완성치수가  $\varnothing 12\text{ mm}$  인 방전 홀을 가공하기 위한 전극의 치수는 Fig. 2와 같다. 방전 홀 전극은 Flushing 홀이 없는 솔리드 형태로 준비하였다. 모든 공구전극은 표면조도가 0.01 mm 으로 일정하게 연마하였다. Table 1에 전극의 속성을 나열하였다.

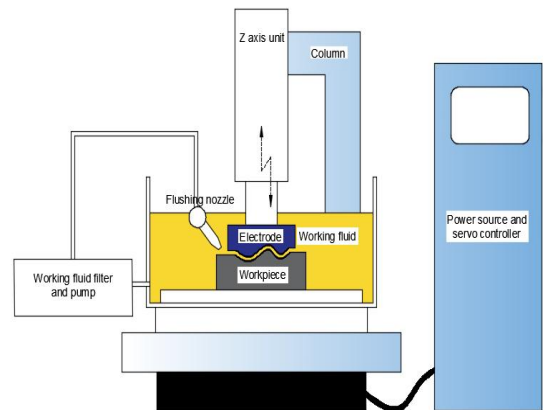


Fig. 1 A Schematic diagram of experimental system

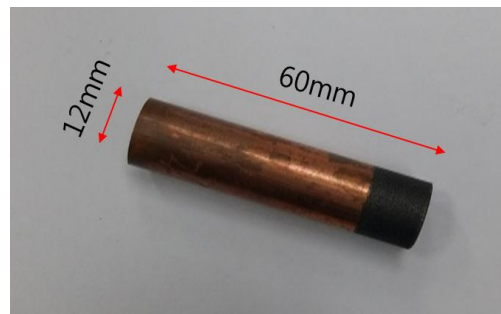


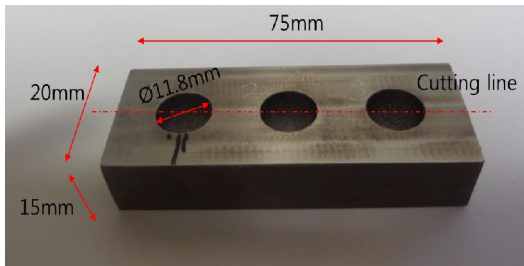
Fig. 2 Electrolytic Copper tool used for machining

**Table 1 Properties of Cu tool**

Property	Value
Composition	99.9% Cu
Melting point	1084.62 °C
Density	8.96 g/cm <sup>3</sup>
Brinell hardness	235-878 MPa
Electrical resistivity	16.78 nΩ·m

### 2.3 실험재료

본 연구에 사용한 시편은 75 mm x 20 mm x 15mm 냉간용 금형 공구강( STD11)을 준비하였다. 냉간용 금형 공구강은 고C, 고Cr 강으로 열처리 이후 높은 경도를 유지하고, 치수 변화가 적고, 냉간 상태에서 내마모성 우수하여 가공품을 냉간 상태에서 가공하는 공구용도로 사용한다. 완성치수가 Ø12 mm인 방전 홀 가공을 위한 시편의 치수는 Fig. 3과 같이 Ø11.8 mm 치수로 방전 가공량을 남기고 CNC장비로 가공하였다. CNC가공 후 시편은 경도를 높이기 위해 진공 열처리하였다. 그리고 열처리 후 시편은 형상의 정밀도를 위해 연삭을 하였다. Table 2와 Table 3에 시편의 화학적 성분과 열처리 조건을 나열하였다.



**Fig. 3 STD11 workpiece**

**Table 2 Chemical composition of the STD11(wt. %)**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
1.40	≤0.40	≤0.60	≤0.03	≤0.03	11.00	0.80	0.20
1.60					13.00	1.20	1.20

**Table 3 Heat treatment condition and hardness of STD11**

Treatment	Value
Quenching	1,040°C A.C
Tempering	180°C A.C
Hardness(HRC)	62

### 2.4 실험방법

가공은 Through hole을 Flushing 홀이 없는 전극으로 가공하였다. 공구전극주변에 설치한 분사노즐을 통하여 방전액인 케로신을 방전이 일어나는 부위에 집중 분사함과 동시에 방전 홀 가공이 진행되는 동안 램의 상하점핑을 진행하여 가공 칩의 배출을 원활하게 하였다. Cu전극에 양극(+)을, 시편에는 음극(-)을 연결하였다. Table 4에 방전 홀의 실험조건을 나타내었다. 이때 Peak current는 방전 전류, Pulse-on Time과 Pulse-off Time은 방전시간 및 휴지시간이며 Reference voltage는 방전전압을 의미한다.

Through hole 가공에서 홀 방전 표면 거칠기에 가장 영향을 줄 것이라 예상되는 최대 전류치(Peak current)와 방전전류의 펄스지속시간(Pluse-on Time)을 제어인자로 선정하여 각 인자별 수준은 3수준으로 실험을 실시하였다. 그리고 최대 전류치와 펄스지속시간을 제외한 펄스단절시간(Pulse-off Time)과 전압(reference voltage)등과 같은 다른 가공 조건 값들은 일정하게 유지하였다.

**Table 4 Experimental conditions**

Experiment Conditions	Value
Pulse-on Time(μs)	130 180 240
Pulse-off Time(μs)	42
Peak current(A)	14.2 18.4 25.6
Reference voltage(V)	70

**Table 5 Experimental layout of L9 orthogonal array**

Pulse-on Time(μs)	Peak current(A)
130	14.2
130	18.4
130	25.6
180	14.2
180	18.4
180	25.6
240	14.2
240	18.4
240	25.6

실험계획법 중 다구찌 기법에서 사용되는 적은 수의 실험횟수로 최적의 효과를 찾을 수 있는 직교 배열표에 의해 가공 조건을 산출하였다. 인자가 2개이고 수준이 3수준일 때 사용 가능한 직교배열표 중 실험횟수를 9번으로 줄인  $L_9$ 을 이용하여 Table 5와 같이 실험을 실시하였다.

가공을 마친 시편을 Fig. 3에 보는 것과 같이 깊이 방향으로 절단 선을 따라 와이어 방전기를 이용하여 두 조각으로 나누었다. 나누어진 방전 홀의 표면을 분석하기 위하여 표면 거칠기를 측정하였다. 스타일러스 형식의 표면 거칠기 측정기를 이용하였다. 서로 다른 방향의 6곳을 측정하여 결과 값으로 도출하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 방전 홀 표면

Fig. 4에서 주효과도에서 보는 것과 같이 Through hole 방전의 표면의 거칠기는 펄스지속시간과 최대 전류치의 값이 커질수록 거칠어진다<sup>[15,16]</sup>. 그 이유는 펄스지속시간과 최대 전류치가 증가할수록 단발방전 에너지의 증가로 인하여 표면이 거칠어진 것으로 판단된다. 소재 제거는 펄스지속시간 동안 적용되는 에너지 양에 비례한다. 이 에너지는 최대 전류치의 크기와 펄스지속시간의 길이에 의해 결정된다. 커진 최대 전류치와 길어진 펄스지속시간이 더 많은 소재를 녹여 없애지게 한다. 그 결과 방전 분화구(Crater)는 더 넓고 깊게 될 것이다. 결국은 이렇게 넓고 깊게 만들어진 방전 분화구(Crater)가 더 거친 표면을 만들게 된다.

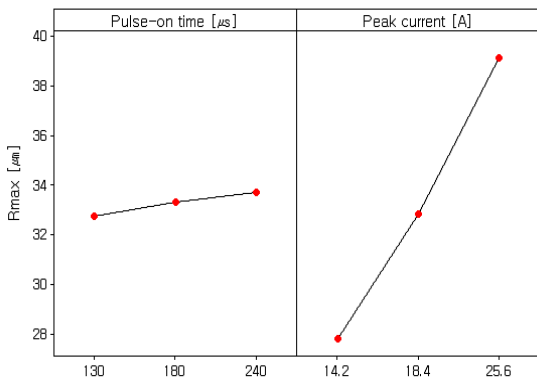
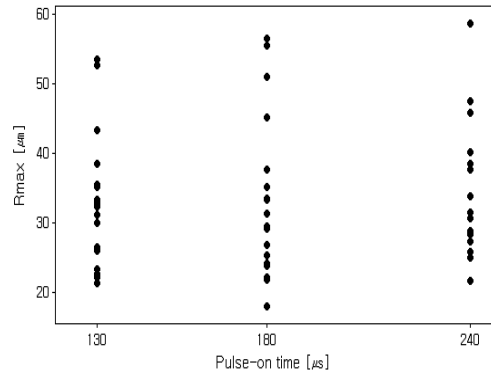
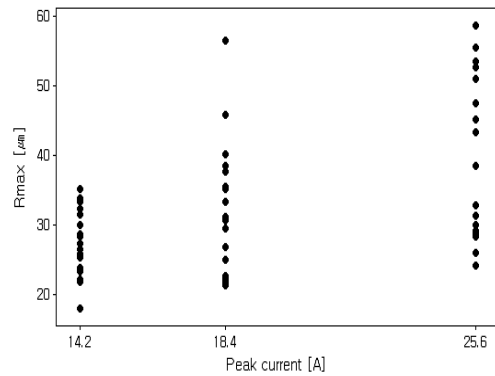


Fig. 4 Main effects plot for Rmax as response



(a) Scatter plot for pulse-on time



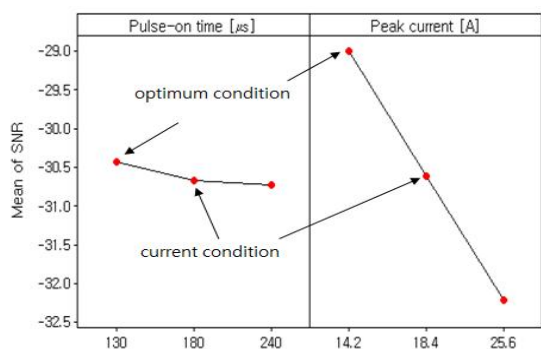
(b) Scatter plot for peak current

Fig. 5 Scatter plots for Rmax as response

Fig. 5의 산점도에서는 각 가공조건 별 시편의 표면 거칠기 분포를 보여준다. 이를 통해 관찰한 결과 Through hole 방전의 표면 거칠기 값의 편차 폭이 예상보다 컸음에도 불구하고 최대 전류치 값이 14.2 A 일 때 가장 좁은 편차의 범위에 있다. 이것은 최대 전류치 값이 14.2 A 가공조건일 때 상대적으로 편차 폭이 큰 다른 조건일 때 보다 방전분포가 고르게 진행되었다는 것을 짐작할 수 있으며 그로인해 가장 좋은 표면이 되었음을 보여준다.

#### 3.2 신호 대 잡음 비(SN 비)

다구찌 기법에서 개선을 위한 정도를 나타내는 측정치로 SN비(Signal-to-noise ratio)를 사용한다. SN비는 잡음에 대한 제어 인자의 영향력 정도를 나타낸다. 이러한 SN비 값이 크면 클수록 신호의 힘이 크고 잡음



Signal-to-noise : Smaller is better

Fig. 6 SN ratio plots for Rmax as response

Table 6 Response table for signal (smaller is better) to noise ratios

Level	Pulse-on time(μs)	Peak current(A)
1	-30.42	-28.99
2	-30.66	-30.61
3	-30.73	-32.21
Delta	0.31	3.21
Rank	2	1

의 힘이 작아지는 것으로 이 SN비 값을 가장 크게 하는 조건이 최적조건이 된다.

$$SN비 = \frac{\text{신호의 힘}}{\text{잡음의 힘}} \text{ (db)}$$

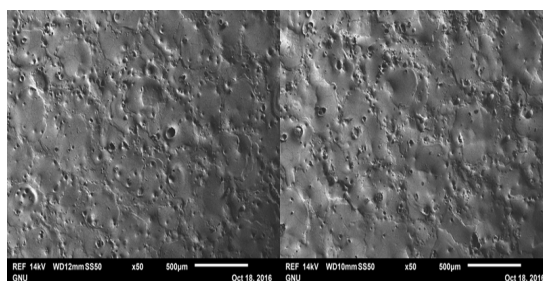
Fig. 6과 Table 6에 따르면 SN비가 큰 최적조건은 펄스지속시간은 130 μs, 그리고 최대 전류치는 14.2 A 이다. 이때 SNR 값은 -28.8117 db 이다. 현행실행하고 있는 펄스지속시간 180 μs, 최대 전류치 18.4 A의 조건의 SNR 값은 -30.6665 db 이다. 개선의 효과를 알아보기 위해 두 SNR 값을 비교하면 현행 수준의 조합 SNR는 -30.6665 db 이고 최적수준의 조합은 -28.8117 db 이므로 2.7174 db 만큼의 이득이 생기는 결과가 된다.

### 3.3 분산 분석(ANOVA)

분산 분석(ANOVA-Analysis of variance)을 하는 이유는 통계적으로 유효한 파라미터를 찾아내고 결과 값에 영향을 주는 파라미터의 중요도를 밝혀내기 위해서이다.

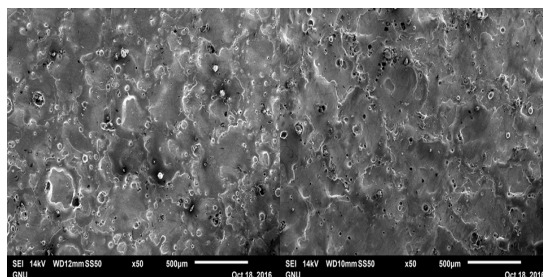
Table 7 ANOVA for SN ratios

Level	DF	Seq SS	F	P	Contribution (%)
Pulse-on time(μs)	2	0.1573	0.25	0.790	0.93
Peak current(A)	2	15.4867	24.62	0.006	91.63
Error	4	1.2581			7.44
Total	8	16.9021			100.00



(a) Peak current 18.4 A, (b) Peak current 25.6 A, Pulse-on time 240 μs

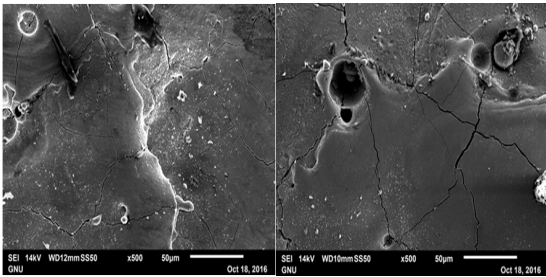
Fig. 7 SEM micrograph by REF method ( x 50)



(a) Peak current 14.2 A, (b) Peak current 25.6 A, Pulse-on time 240 μs

Fig. 8 SEM micrograph by SEI method( x 50)

Table 7에 따르면 Through hole 방전의 특성치인 표면 거칠기에 가장 영향을 주는 인자는 최대 전류치이다. 각 인자의 기여도를 보면 최대 전류치(91.63%), 펄스지속시간(0.93%) 순으로 표면 거칠기에 영향을 준다. 그러므로 현행 수준보다 문제의 개선인자로 찾은 펄스지속시간을 180 μs 에서 140 μs 로 수준을 변경하고 최대 전류치를 18.4 A 에서 14.2 A 로 수준을 변경하면 Through hole 방전의 표면 거칠기가 개선 될 것이다.



(a) Peak current 14.2 A, (b) Peak current 25.6 A, Pulse-on time 240  $\mu$ s Pulse-on time 240  $\mu$ s

Fig. 9 SEM micrograph by SEI method(x 500)

### 3.4 표면 성상

현미경을 통하여 분석한 방전 가공 후의 표면에서는 방전 생성물인 방전분화구(crater), 용융층(melted metal), 전극과 공작물에서 전기 화학적으로 용출된 구슬 모양의 입자(Chip) 등이 관찰된다. 이러한 방전으로 인한 생성물들의 집적이 결국 표면의 거칠기가 되는 것이다. 기 보고된 연구에 의하면 최대 전류치는 방전 분화구의 직경에 비례하고 펄스지속시간은 방전 분화구의 깊이에 비례하는 것으로 알려지고 있다. Fig. 7와 Fig. 8를 살펴보면 최대 전류치의 차이에 따른 방전 생성물의 분포가 다르게 관찰된다. 최대 전류치가 커질수록 재 구조층이 두텁게 형성되고 방전흔이 커짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 최대 전류치의 증가뿐만 아니라 펄스지속시간의 증가에서도 같은 현상이 나타난다고 보고되고 있다. 그러므로 우수한 방전 가공면을 얻기 위해서는 낮은 최대 전류치와 짧은 펄스지속시간이 요구되어 진다.

방전 가공 후의 표면에는 방전 생성물 뿐 아니라 미세 균열(Micro crack)이 관찰된다. 미세 균열의 원인은 방전 가공의 과정에서 용융 금속이 팽창압력에 의해 자유롭게 퍼져 있는 상태에 두 전극 사이의 간극에 절연액이 다시 채워지게 되면서 용융금속의 급속응고에 따른 수축으로 표면에 발생한 인장응력으로 인해 발생한다. 이 미세 균열은 제품의 사용 환경과 용도에 따라 조기 파손을 유발할 수도 있어서 연마같은 후처리 과정이 필요할 수도 있다. Fig. 9에 보는 바와 같이 최대 전류치가 커질수록 미세 균열의 틈의 간격이 상대적으로 크게 관찰된다. 미세 균열의 깊이 또한 최대 전류치가 커질수록 깊어진다는 연구가 있다. 이러한

현상은 최대 전류치의 증가뿐만 아니라 펄스지속시간의 증가에서도 같은 현상이 나타난다고 보고되고 있다. 그러므로 미세 균열을 줄이기 위해서는 낮은 방전 에너지 값에서의 가공조건 설정이 필요하다.

## 4. 결론

본 연구를 통해 Cu전극으로 열처리를 한 냉간용 금형 공구강인 STD11을 시편으로 하여 방전 홀 가공을 한 후 방전시간과 방전전류라는 조건이 방전 홀 형상에 미치는 영향을 다구찌 기법에 의해 계획하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 방전 홀 표면이라는 특성치에 가장 영향을 준 가공인자는 최대 전류치이다. 각 인자별 기여도를 보면 최대 전류치(91.63%), 펄스지속시간(0.93%) 순이다.
2. 펄스지속시간이 130  $\mu$ s 이고 최대 전류치 값이 14.2 A 일 때 방전분포가 고르게 진행되어 방전 홀 표면 거칠기가 가장 좋게 가공이 되었으며 펄스지속시간과 최대 전류치가 증가할수록 방전 홀 표면이 거칠어지는 결과를 얻었다.
3. 최대 전류치 값이 커질수록 방전가공으로 인한 생성물인 용융층은 더 두텁게 형성이 되며 방전분화구, 용출 입자 등은 더 많이 분포되며 그리고 표면의 인장응력으로 생긴 미세 균열의 틈이 더 커진다.

## REFERENCES

1. DiBitonto, D. D., Eubank, P. T. et al., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model," Journal of Applied Physics, Vol. 66, No. 9, pp. 4095-4103, 1989.
2. Song, K. Y., "DEVELOPMENT OF STRIP EDM," A Thesis for a Doctorate, Seoul National University, Republic of Korea, 2012
3. Tsai, H. C., Yan, B. H., Huang, F. Y., "EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, No. 3, pp.

- 245-252, 2003.
4. Kim, C. H., "Improvement of the ED-Drilling Machinability using Multi-hole Electrodes," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 5, pp. 88-93, 2012.
  5. Tsai, H. C., Yan, J. H. and Huang, F. Y., 2003, EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes, International Journal of Machine Tools and Manufacture Vol. 43, No. 3, pp. 245-252
  6. Ho, K. H. and Newman, S. T., "State of the art electrical discharge machining (EDM)", International Journal of Machine Tools and Manufacture Vol. 43, No.13, pp.1287-1300, 2003.
  7. Song, K. Y., Chung, D. K., Park, M. S. and Chu, C. N., "Tape EDM", Proceedings of KSPE 2012 spring Conference :11-12
  8. Sanjeev Kumar, Rupinder Singh, T.P. Singh and B. L. Sethi, "Surface modification by electrical discharge machining", Journal of Materials Processing Technology Vol. 209, No. 8, pp.3675-3687, 2009.
  9. Krishna, K., S., Anand, S., S., Sanjay, A., "Experimental investigation into the micro-EDM characteristics of conductive SiC," Journal of Ceramics International, Vol. 42 No. 1, pp. 1597-1610, 2016.
  10. Kwon, W. T., Kim, Y. C., "Process Optimization for Productivity Improvement during EDM machining of a micro-hole," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 21 No.4. pp. 556-562, 2012.
  11. Lee, C. S., "A Method of Hole Pass-Through Evaluation for EDM Drilling," Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol. 38, No. 3, pp. 220-226, September 2012.
  12. Kumar, N. M., Kumaran, S. S., Kumaraswamidhas, L. A., "An investigation of mechanical properties and material removal rate, tool wear rate in EDM machining process of AL2618 alloy reinforced with Si3N4, AlN and ZrB2 composites," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 650, pp. 318-327, 2015.
  13. Ferreira, J. C., "A study of die helical thread cavity surface finish made by Cu-W electrodes with planetary EDM," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 34, No. 11-12, pp. 1120-1132, 2007.
  14. Kim, B., H., "Micro Hole Machining Using MEDM with Screw-Type Electrode," Master Thesis, Seoul University 1999.
  15. Lee, E., J., "A Study on the Electrical Discharge Machining Tap by using Cu Electrodes of the Cold-Work Tool Steel," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 5, pp. 131-136, 2016.
  16. Park, I., S., "A Study on the Electrical Discharge Blind Hole Tap Machining of STD11 with Copper Electrode" Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 3, pp. 38-44, 2017.