

## 전극의 재료와 크기가 방전가공량에 미치는 영향

최재용\* · 김희중\* · 전언찬\*\* · 정재현\*\*

### Influence on Metal Removal Rate by Material and Size Difference of the Electrode

J.Y CHOI\* · H.J. KIM\* · E.C. JEON\*\* · J.H, JEONG\*\*

**Key words** : Pulse - on duration(방전 펄스 폭), Discharge induction(방전 유발), EDM(Electric Discharge Machining), Metallic molding steel(금형용강), MRR(metal removal rate:가공량), Graphite electrode(흑연전극), Copper electrode(동전극)

#### Abstract

This study has been performed to investigate MRR(metal removal rate), surface roughness, with various pulse - on duration using the copper and graphite electrode according to the electrode size on the heat treated STD11 which is extensively used for metallic molding steel in the EDM.

The results obtained are as follows ; a) MRR increases a lot when pulse - on duration is 100  $\mu$ s or less, but MRR has little difference with pulse - on duration of 100  $\mu$ s or more. b) According to the increase of Pulse - on duration the larger the electrode size, the more MRR. c) Safe discharge is needed to make maximum of MRR and the metallic organization must be complicated for discharge induction. d) Actual machining time is longer than theoretical machining time at the short pulse - on duration because of skin effect of current. e) Graphite electrode needs the larger electric discharge energy than copper electrode to remove remained chips completely.

#### 1. 서 론

일반적인 방전가공법은 비교적 절삭하기 쉬운 도전성 재료를 공구전극으로 하고 또다른 도전성 재료를 피가공물로 대응시켜 두 물체 사이에 캐로

신이나 탈이온수를 개재시킨다. 그리고 두 간극에 60~300V 정도의 펄스전압을 간헐적으로 스파크 방전시켜 그때 발생하는 이상 소모현상을 이용하여 공구전극형상에 맞춘 양극 대칭 형상으로 피가공물을 가공하는 방법이다. 이 가공법은 가공액의

\* 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 98년 6월)

\*\* 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* 한국해양대학교 이공대학 기계냉동자동차공학부

개재가 필수적이고 간헐적인 스파크 방전을 이용하는 점에서 공기중에서 연속적인 아아크 방전을 이용하는 용접등과는 완전히 구별된다.

그러나 방전가공 프로세스는 매우 복잡하다. 이 가공법이 창시된 이후 형조방전가공기는 그 나름대로 방전가공프로세스를 좌우하는 변수가 도출되어 제어되고 있다.

한편 방전가공은 가공속도가 낮고 경험에 의존하는 정도가 종전의 가공법에 비하여 크다는 등의 비판이 나오고 있다.

그러나 방전가공이 없으면 현재처럼 복잡하고 다양해진 제품 가공에 대한 열망을 결코 만족할 수 없다. 그렇기 때문에 합리적인 CIM/EDM을 조직화하는 것은 방전가공에 종사하는 입장에서는 하나의 의무 사항이다.

그리고 가공에 의한 표면 손상의 성질이나 정도를 파악하는 것이 중요하고, 복잡한 형상의 재료에 대한 가공비용이 매우 높아 간편한 가공법의 확립이 요구되고 있다. 그래서 고경도 재료를 비교적 간단히 가공할 수 있는 방전가공법을 응용하는 것이 복잡한 형상의 가공에 대한 응용면에서 볼 때, 연삭가공 등과 비교하여 방전가공의 우위성이 나타나고 있다<sup>1)</sup>.

방전가공에서 전극과 공작물사이에 방전이 일어나는 지점은 거의 모든 경우 극의 틈새를 따라 단 한곳이다. 그 이유는 일단 절연파괴가 생긴 경우에는 증발 금속원자와 그 전리이온이나 전자등으로 이루어지는 플라즈마에 싸여 다른 장소에 비해 전류가 흐르기 쉽게 되기 때문이며 이것은 미세방전에도 적용할 수 있음을 나타낸다<sup>2)</sup>. 열처리한 STD11의 Wire cut - EDM 가공 특성에 미치는 방전가공조건에 대하여는 많은 연구가 진행되어 왔으나<sup>3)~7)</sup>, Die sinking EDM에 의한 방전가공의 특성과 전극재료에 따른 최적 방전가공조건에 대하여는 아직도 미흡한 실정이다. 특히 가공면에 대해서는 치수 형상 정밀도나 표면거칠기 등과 같은 외관적인 평가 이외에 제품으로서의 내마모성, 내식성 등에 대한 성능적인 평가도 포함하는 표면성상(Surface Integrity)이라는 단어가 종종 사용되고 있으며 가공면의 개선에 대한 관심이 점점 높아지고 있고<sup>8)~9)</sup>, 방전가공기의 발달과 함께 넓은 면적

의 방전가공이 요구되고 있다.따라서 본 연구에서는 CNC 방전가공기에서 동전극(Copper electrode)과 흑연전극(Graphite electrode)을 이용하여 금형제품에 널리 사용되는 열처리된 STD11을 대상으로 방전전류펄스폭을 변화시켜 전극의 크기에 따른 공작물의 가공량을 관찰, 평가하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험재료

본 실험에 사용한 실험재료인 STD11은 금형산업에 널리 사용되는 합금공구강으로써 그 화학적 성분을 Table 1에 나타내었고, Table 2의 조건으로 열처리한 후, 에머리 페이퍼 #1000으로 정밀 연마하여 가공면의 표면조도를  $R_{max} = 0.5 \mu m$ 으로 일정하게 하였다.

Table 1 Chemical compositions of the STD11(wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W
1.64	0.35	0.25	0.025	0.002	11.19	0.54	0.17	0.44

Table 2 Heat treatment conditions and hardness of the STD11

Quenching	Tempering	Hardness(Hv)
1,030℃, 1hr O.C.	200℃, 1hr A.C.	720

그리고 전극재료인 동전극은 밀링머시인으로 단면가공하였고, 흑연전극은 에머리 페이퍼 #1000으로 연마하여 표면조도를  $R_{max} = 0.5 \mu m$  일정하게 하였으며, Table 3의 조건으로 각각 실험하였고, Table 4는 동전극과 흑연전극의 물리적 성질을 나타내었다.

Table 3. Experimental conditions

Item	Unit	Conditions
Pulse on duration	$\mu s$	20, 50, 100, 200, 400
Pulse off duration	$\mu s$	20(constant)
Peak pulse current	A	10
No - load voltage	V	90(constant)

**Table 4. Physical properties of graphite and copper electrode**

Item	Unit	Graphite	Copper
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.82	8.93
Flexural	kg/cm <sup>2</sup>	590	3000
Resistivity	μΩ/cm	1400	1.72
Vickers hardness	Hv	544	55
Specific heat	J/g · K	0.669	0.117
Melting point	K	3800	1400
Open porosity	%	8	about 0
Heat of fusion	cal/cm <sup>3</sup>	41.8	83.1

2.2 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 실험에 사용한 CNC 방전가공기(A3C-R)는 컴퓨터가 내장되어 각종 가공조건 및 좌표값을 연산처리하기 위한 기능이 장착되어 있으며 주축대 및 테이블은 DC 서어보 모터와 정밀 볼스크류에 의해 제어되어 이송이 매우 정밀할 뿐만 아니라 입력된 프로그램에 의해 정확한 가공치수의 설정이 가능하며, 항상 깨끗한 가공액을 가공탱크에 충전시키는 구조로 되어 있다. 그림에서 ①은 주축대, ②는 클램프이며, ③은 전극을 고정하기 위한 SNT콜렛전극홀더(SNT12: Sodick national taper)이고, ④는 전극이다. 그리고 ⑤는 시험편, ⑥은 정밀 바이스, ⑦은 테이블, ⑧은 가공

탱크, ⑨는 가공액이다. ⑩은 방전에서 발생하는 분해가스, 가공칩, 탄화물 등을 배출시키기 위한 가공액 분사 노즐이며, ⑪은 서어비스 탱크, ⑫는 가공액 송출 펌프이다.

2.3 실험방법

방전가공기의 SNT 콜렛전극홀더에 전극을 고정시키고, 시험편과 전극의 직각도를 검사한 후 방전현상에 영향을 주는 각 가공조건을 Table 3과 같이 변화시켜 동전극과 흑연전극의 면적별로 같은 조건으로 실험하였다. 전극은 각각 직경이 10, 15, 20mm의 원봉을 사용하였으며, 실험에 사용한 가공액은 케로신(Kerosine : KOTON 600)이고 가공탱크내의 가공액 높이는 시험편의 상면으로부터 80 mm가 되도록 하였고, 가공부위로부터, 10 mm 거리에서 가공액 분사 노즐을 통해 1 kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 가공액을 분사시켰다. 실험전 시험편을 에머리 페이퍼 #1000으로 정밀 연마하여 3분간 초음파 세정을 하고 건조시킨 후 디지털 천칭으로 무게를 측정하였고, 가공후 시험편의 중량 감소량을 측정하여 단위시간당 공작물 가공량을 구하였다. 그리고 가공면은 전자현미경으로 사진 촬영하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가공속도의 이론적 고찰

방전혼은 하나의 방전으로 생성되며 이것이 연이어 가공면 전체에서 방전유발을 일으켜 방전혼의 깊이만큼 가공이 진행된다.

여기서 가공면적을 S로 하면 방전혼의 깊이 H 만큼 가공하기 위한 방전수는

$$F_0 = \frac{S}{(1/4)\pi D^2} \tag{1}$$

$F_0$  : 면적 S를 커버하는 방전수

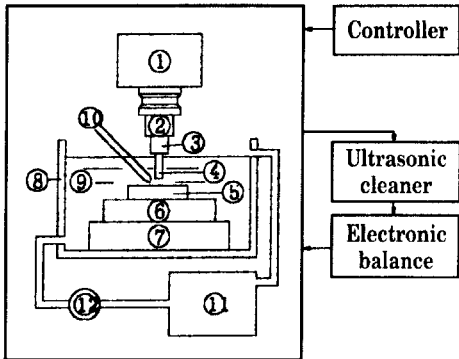
$H$  : 방전혼의 깊이 (μm)

$D$  : 방전혼의 지름 (μm)

$S$  : 면적 (μm<sup>2</sup>)

로 된다.

$F_0$  개의 펄스는 시간  $t$ 를 생각하면



- ① EDM head stock
- ② Clamp chuck
- ③ SNT collet electrode holder
- ④ Electrode
- ⑤ Workpiece
- ⑥ Precision vise
- ⑦ Table
- ⑧ Work tank
- ⑨ Dielectric fluid
- ⑩ Nozzle injection
- ⑪ Service tank
- ⑫ Pump

**Fig. 1 Experimental apparatus of EDM**

$$F_0 = f \cdot t = \frac{t}{\tau_{on} + \tau_{off} + \tau_w} \quad (2)$$

$t$  : 면적  $S$ 를 가공하는 시간 (Sec)

$\tau_{on}$  : 방전펄스폭 ( $\mu s$ )

$\tau_{off}$  : 방전휴지시간 ( $\mu s$ )

$\tau_w$  : 대기시간 ( $\mu s$ )

로 되고, 여기서  $\tau_w \ll \tau_{off}$ 인 경우

$$F_0 = \frac{t}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (2)$$

로 된다.

단위시간당 면적이 가공속도는 식(1), (3)에서

$$\frac{S}{t} = k_s \frac{(1/4)\pi D^2}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (4)$$

$k_s$  : 상수 ( $10^6$ )

로 되고, 단위시간당 체적이 가공속도는

$$\frac{SH}{t} = k_H \frac{(1/4)\pi D^2 H}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (5)$$

$k_H$  : 상수 ( $10^6$ )

로 표현된다.

결국 식 (4), (5)는 방전시간과 방전휴지시간 그리고 단일방전으로 생기는 면적 또는 체적비로 가공속도를 구할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.2 방전흔과 가공량

방전가공에서는 기저가공이 주체이므로 정도향을 위해서 가공특성인 전극소모 clearance 및 표면조도가 대단히 중요하며, 가공속도까지 포함한 가공특성은 방전펄스등 전기조건의 영향을 받는다. 그리고 방전점에서는 불꽃방전에 의한 절연 파괴로 단시간의 아아크를 발생시켜서 아아크 각부(脚部: Bridge)를 증발 또는 용융시키고 동시에 아아크열에 의해 가공액이 기화 또는 팽창 폭발됨으로써 가열되고 있는 아아크 각부의 금속을 비산시켜서 방전흔(Crater)이 생기게 된다.

방전시간과 방전휴지시간 그리고 단일방전으로 생기는 면적 또는 체적비로 가공속도를 구할 수 있는데 방전흔의 직경(D)과 깊이(H)의 비(H/D)는 보통 1/10 ~ 1/20 정도이며, 황삭가공일때는 1/20을

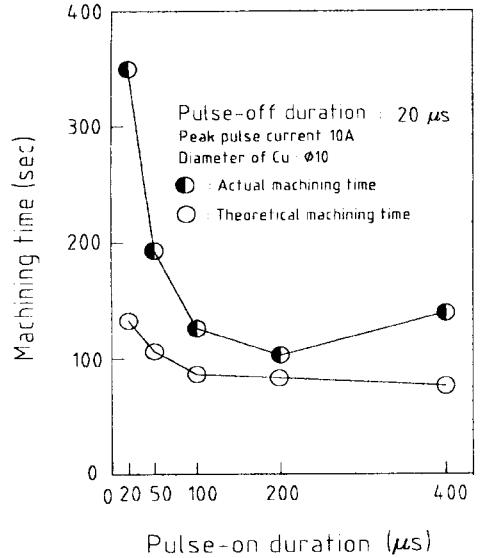


Fig. 2 Relation between machining time and pulse-on duration with copper electrode

초과한다. Fig.2는 이론에 의한 소요시간과 실제가공시간을 나타낸 것이다.

그림에서 방전펄스폭( $\tau_{on}$ )이 증가함에 따라 이론적으로는 가공시간이 줄어든다. 그것은 방전펄스폭이 길어짐에 따라 전류밀도가 낮아져 넓은 범위의 용융을 가져오므로 방전흔의 직경은 커지기 때문이라고 생각된다.

그러나 실제 가공시간과 이론적 계산에 의한 가공시간과는 상당한 차이가 존재한다. 그것은 이론적 계산치는 단발방전의 경우이고, 실제 가공은 연속방전인데, 연속 방전의 경우 방전흔의 중첩에 의한 영향으로 시간이 더 많이 소요되고 또한 전극과 가공물간의 운동에 의해 가공액의 유입, 배출을 원활히 하기 위한 AJC(Pumping by Auto Jump Control) 기능에 의한 시간이 누적된 결과라고 생각된다. 또한 실제로 방전이 반복되고 있는 방전 간극사이에는 간극에 재개되는 칩이나 분산, 그리고 용융온도와 더불어 용융잠열(Heat of fusion)등 물리적 조건에 따라 시시각각으로 변한다. 방전 간극중에는 가스나 타르도 포함되며 때로는 가스중 방전도 생긴다. 또 에너지가 펄스적으로 공급되므로 전극에 흐르는 전류는 표피효과(표면에 전류가 집중한다는 효과)를 나타내고 또한 분산에 의한 단

락, 통전등의 현상도 일어나기 때문에 더 많은 시간이 소요된다고 생각된다. 따라서 방전펄스가 짧은 쪽에서는 표피가 지배적으로 작용하고, 긴쪽에서는 낮은전류밀도에 의한 분출압력의 저하등에 기인하여 가공시간은 더 많이 소요되고 흑연전극도 유사한 양상을 보인다고 생각된다.

### 3.3 전극의 크기에 따른 가공량

가공속도는 일반적으로 단위시간당의 가공량으로 표시되고 현재 최대가공속도는 50 g/min 정도까지가 실용화 되어있다.

Fig. 3은 펄스 휴지폭을 20  $\mu$ s, 방전피크전류 ( $I_p$ )를 10A로 일정하게 한 후 방전펄스폭을 20  $\mu$ s에서 400  $\mu$ s까지 단계적으로 변화시켰을 때의 동전극 및 흑연전극의 단면적에 대한 공작물 가공량을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전극의 단면적이 커질수록 공작물 가공량은 증가하고,  $\tau_{on}$ 이 증가할수록 공작물의 가공량은 증가하다가 일정치에서 감소 또는 유지한다. 즉 동전극이나 흑연전극 모두  $\tau_{on}$  50  $\mu$ s까지는 가공량이 급격히 증가하고 흑연전극은  $\tau_{on}$  100  $\mu$ s에서, 동전극은  $\tau_{on}$

200  $\mu$ s에서 최대치를 나타내며 그 이상은 서서히 감소 또는 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 펄스폭이 짧은 경우에는 피크전류가 규정된 전류까지 도달하는데 시간이 걸리기 때문에 방전피크전류값에 도달하지 못하여 가공량이 감소하는 것이라고 생각된다. 한편 역극성 회로를 사용하여 동전극으로 강을 가공한 경우의 전류밀도  $J(st(-)cu(+))$ 는 다음과 같이 표시된다<sup>(10-13)</sup>.

$$J(st(-)cu(+)) = I_p / (\pi/4) (2.4 \times \tau_{on}^{0.4} \times I_p^{0.4})^2 = 0.22(I_p)^{0.2} / (\tau_{on})^{0.8} (A/cm^2) \quad (6)$$

식(6)에서  $\tau_{on}$ 이 증가할수록 전류밀도는 작아진다. 즉 펄스폭이 긴쪽에서 가공속도가 저하되는 것은 전류밀도가 낮아짐에 따라 방전압력이 낮아지기 때문에 용융금속을 충분히 비산시킬 수 없어서 용융금속이 가공물의 표면에 많이 남게 되어 가공속도가 떨어지고 불안정한 상태로 되기 때문이라고 생각된다.

또한 전극의 면적에 따른 가공량은  $\tau_{on}$ 이 100  $\mu$ s 이하에서는 별 차이가 없지만 그 이상에서는 전극의 면적이 증가할수록 가공속도도 증가한다.

먼저 전극의 면적이 작은 경우는 전극면적의 영향으로 방전이 집중되기 쉬워서 그것이 반복방전을 저지하는 원인이 되어 가공속도가 떨어진다고 생각된다. 여기에서 방전의 집중현상은 면적효과뿐만 아니라 방전에 의해서 생긴 가공칩등이 전극 사이에 퇴적하게 되어 방전시 그것들이 방전면에 부착함으로써 일어나고 또 가스중 방전등 여러 현상이 발생하게 되기 때문에 가공속도가 떨어진다고 생각된다.

그리고 전극면적의 증가와 함께 가공량이 증가하는데 이것은 가공의 안정에 필수적인 방전유발을 쉽게 할 수 있기 때문이라고 생각된다.

마지막으로 전극의 직경이 10 mm일 때 동전극과 흑연전극의 가공량을 비교해 보면 방전펄스폭 50  $\mu$ s이하에서는 동전극에 비해 흑연전극을 사용했을 때 가공속도가 높게 나타나고 있다. 이것은 방전유발을 위해서는 조직이 치밀해야 하는데 동전극에 비해 흑연전극이 우수하고 내열성이 높기 때문이라고 생각된다. 그러나 그 이상에서는 동전극의 가공속도가 높아지는데, 이것은 펄스폭의 증

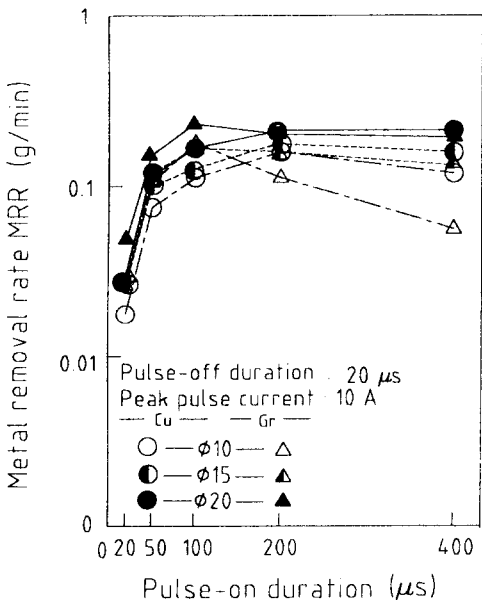


Fig. 3 Relation between metal removal rate and Pulse-on duration with copper and graphite electrode

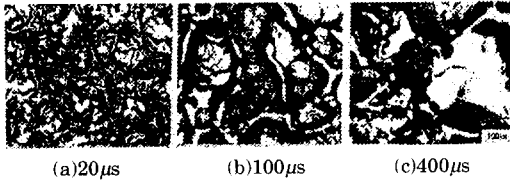


Fig. 4 Photo. of the EDM surface on variation of pulse - on duration with copper electrode :  $I_p=10A$

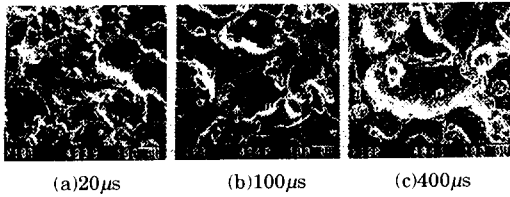


Fig. 5 Photo. of the EDM surface on variation of pulse - on duration with graphite electrode :  $I_p=10A$

가에 따라 전류밀도가 작아지며 전기저항이 큰 흑연전극의 방전에너지가 상대적으로 더 낮아지기 때문이라고 생각된다. 또한 용융온도와 더불어 용융잠열의 영향도 받게 되는데 방전펄스폭이 짧을 때에는 방전주기가 짧기 때문에 가공량에 크게 영향을 미칠수 없지만 방전 펄스폭이 긴 경우에는 그 영향을 간과할수 없는데 동전극의 용융잠열이 커기 때문에 가공량이 많아지는 것으로 생각된다.

Fig. 4는  $I_p$ 가 10A이고  $\tau_{on}$ 이 20  $\mu s$ , 100  $\mu s$ , 400  $\mu s$ 일때 동전극을, Fig. 5는 같은 조건에서 흑연전극의 방전가공면을 찍은 사진이다. Fig. 4와 Fig. 5에서 방전 펄

스폭의 증가에 따라 방전흔의 직경도 커지는데 펄스폭이 400  $\mu s$ 인 경우 이상방전으로 인해 방전흔 주위에 crack이 형성되어 있는 것을 알 수 있는데 이것은 용융물이 가공액에 의해 급속히 냉각되는 쿨링효과 때문이라고 생각된다. 그리고 Fig. 4의 (a)와 Fig. 5의 (a)를 비교해 보면 동전극에 비해 흑연전극의 방전점의 이동이 매우 조밀하여 표면 조도가 좋게 됨을 알 수 있다. 또한 방전흔의 직경은 흑연전극 가공면이 동전극 가공면 보다 크게 형성되기 때문에 흑연전극이 동전극을 사용했을 때 보다 가공칩의 충분한 비산을 위하여 큰 방전에너지가 필요하다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

CNC 방전가공기로 금형제품에서 널리 이용되고 있는 열처리한 STD11을 사용하여 방전전류펄스폭을 변화시켜 공작물의 가공량을 동전극과 흑연전극을 대상으로 전극의 크기별로 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 방전펄스폭이 100  $\mu s$ 이하에서는 가공량이 크게 증가하고, 그 이상의 펄스폭에서는 큰 변화가 없다.
2. 전극의 면적이 증가하면 가공량도 증가한다.
3. 가공속도를 최대로 발휘하기 위해서는 안정된 방전이 필수적이고 방전유발을 위해서는 조직이 치밀해야 한다.
4. 방전펄스가 짧은 쪽에서는 전류의 표피효과 때문에 실제가공시간이 이론치 보다 길어진다.
5. 흑연전극이 동전극보다 가공칩의 충분한 비산을 위하여 큰 방전에너지가 필요하다.

#### 참고문헌

1. M. Nakamura, "EDM of Ceramics", Journal of the JSPE, Vol.57, No.6, pp.959~962, 1991
2. 増澤隆久, "微細放電加工", 日本精密工學會誌, 第57卷, 第6號, pp.31~35, 1991
3. 増井清徳, 曾根 匠, 出水 敬, "ワイヤ放電加工面の硬さ變化", 日本精密工學會誌, 第57卷, 第1號, pp.138~143, 1991
4. Y. Suzuki, "Improvement of Surface Roughness in Wire EDM", ISEM -9, pp.80~88, 1989
5. 國枝正典, "放電加工における放電点分布の觀察", 日本精密工學會誌, 第57卷, 第6號, pp.941~944, 1991
6. 양민양, 이용기, "R-Map을 이용한 와이어컷 방전가공의 검정", 대한기계학회지, 제19권, 제12호, pp.3281~3288, 1995
7. K. K. Hon, "An Experimental Study of Built-up Phenomenon in EDM", ISEM -9, pp.321~324, 1989
8. 増井清徳, 曾根 匠, "放電加工面の性狀と高品位化", 日本精密工學會誌, 第56卷, 第6號, pp.13~16, 1990

9. 김민진, 지전근, 태원필, “고경질재료방전가공부의 피로파괴 특성”, 대한기계학회지, 제17권, 제1호, pp21~26, 1993
10. 김창호, “방전가공”, 기전연구사, 1994
11. 井上梁, “放電加工의 實際와 應用”, 枝多利, 1987
12. 柳濟九, “放電加工”, 大光書林, 1988
13. 최재용, 전언찬, 정재현, “방전에너지에 따라 동전극과 흑연전극이 방전가공면에 미치는 영향”, 한국정밀공학회지, 제14권, 제5호, pp.53~59, 1997