

## STD-11 합금공구강과 P-20 초경합금재의 WEDM 특성에 관한 연구

이재명, \* 허성중, \*\* 김원일\*\*\*

### A Study on the Characteristics of Wire-Cut Electrical Discharge Machining for STD-11 Alloy Steel and P-20 Tungsten Carbide Alloy

Jae Myeong Lee. \* Seoung Jung Heo. \*\* Won Il Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

From the experimental study of Wire-Cut Electric Discharge Machining of STD-11 alloy steel and P-20 tungsten carbide, the characteristics such as hand drum form and discharge gap have been observed and evaluated for various conditions. Hand drum form can be improved when gap voltage and spark cycle become smaller, thickness become thinner, wire tension become larger and the no. of cutting increases. When 60mm thickness tungsten carbide is cut in normal condition, hand drum form becomes larger due to the low conductivity machining allowance becomes slightly larger when peak discharge current and gap voltage become larger, or wire tension becomes smaller. Under the same condition, machining allowance of tungsten carbide is larger than alloyed steel by 1/100mm.

**Key Words** : WEDM(와이어 컷 방전가공), Hand Drum Form(북 현상), Discharge Gap(방전간극), WC-Co(초경합금), Duty Factor(충격계수)

#### 1. 서 론

종래의 절삭, 연삭과 같은 기계적인 가공 방법으로는 금형 및 기계 부품의 고정밀도 가공이 곤란함에 따라 재료 제거의 원리가 기계 가공과 전혀 다른 방전가공과 같은 특수 가공법을 사용하기에 이르렀으며 적용 가공

재료의 유효 범위나 가공 능률, 고정밀도의 면에서도 급속도로 발전하여 무인화, 자동화에 적응하려 하고 있다.<sup>(1,2)</sup>

특히 와이어컷(Wire cut) 방전가공은 공작물과 전극 사이에서 방전 현상(Arc방전)을 일으키며, 이때 발생하는 열 및 압력을 이용하여 공작물을 녹여서 자르게 된

\* 경남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 두원공업전문대학 기계과

\*\*\* 경남대학교 기계공학과

다. 와이어 전극과 공작물 사이에는 매초당 수만 내지 수십만회의 방전 현상이 발생하며, 방전 부위에 발생하는 열은 수 천 도에 이른다. 이 열에 의하여 공작물과 와이어 전극은 국소적으로 용융되어 표면에 방전 흔이 생기며, 이때 발생하는 칩(chip)은 노즐에서 분사되는 가공액에 의하여 제거된다.<sup>(4,5)</sup>

본 연구에서는 현재 금형 재료로서 가장 많이 사용되고 있는 합금 구강 STD-11종과 난삭재료인 초경합금 P-20을 대상으로 방전간극 전압을 일정하게 유지하여 안정된 가공을 하는 자동 제어 방식을 이용하였으며 최대 방전 전류, 방전간극전압, 방전 주기, 와이어장력, 가공물 두께 등의 인자들이 복현상, 방전간극 등의 가공 특성에 미치는 영향을 고찰함으로써 고능률, 고정밀도, 고품위의 가공을 할 수 있는 적절한 가공 조건을 찾는 데 목적을 두었다.

## 2. 복현상과 방전간극

복현상(Hand drum form)은 와이어 방전가공 특유의 현상으로서 중앙부의 치수가 작게 되는 것으로 다음과 같은 요인에 의한 것이다.

- ① 와이어는 가공 중에 상하 가이드에 지지되어 방전에 의한 반발력 때문에 진동하므로 공작물 중심부의 진폭이 최대로 된다.
- ② 가공액은 공작물의 상하에서부터 주어지지만, 공작물의 상하부와 중앙부에서는 비저항이 다르다. 공작물의 상하부에 있어서 비저항치는 중앙부의 비저항치보다 상대적으로 높기 때문에 중앙부 쪽이 방전하기가 쉽게 되어 중앙이 꺼지게 된다.
- ③ 공작물의 중앙부에서 배출되는 가공칩에 의하여 2차방전이 발생되어 복현상이 일어난다.

방전간극(Discharge gap)은 Fig. 1과 같이 방전 개시 간극과 방전 시에 공작물의 용융증발이 기계적 압력에 의해 비산하여 확대되는 간극과의 총량이다. 이론적으로는 가공면적칠기와 동일한 특성 관계라고 생각되며, 주변의 방전간극  $\delta_0$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.<sup>(6,7)</sup>

$$\begin{aligned} \delta_0 &\propto P_s \\ &\propto \epsilon_0^{0.5} \\ &= K_{\delta_0} (T_m \cdot I_p)^{0.5} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $P_s$  : 방전 시의 발생 압력 (dyne/cm<sup>2</sup>)

$\epsilon_0$  : 방전 에너지 (J)

K 상수

$T_m$  : 방전 시간 ( $\mu$ s)

$I_p$  : 최대 방전 전류 (A)이다.

한편, 방전간극과 가공 깊이와의 관계를 생각하면 측면 방전간극은 가공의 진행에 따라 방전간극에서 배출되는 가공칩에 의한 2차방전에 의해 확대된다.

측면 방전간극을  $\delta$ 로 하면 전극 전입 깊이 t와의 함수로서 다음과 같이 표시된다.<sup>(8)</sup>

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_0 \left( 1 + \exp \frac{-\alpha}{x} \right) \\ &= K_{\delta} (T_m \cdot I_p)^{0.5} \left( 1 + \exp \frac{-\alpha}{x} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\alpha$  : 확대 계수이다.

## 3. 실험 기기 및 방법

### 1) 실험 기기

본 실험에서 사용한 와이어컷 방전가공기는 일본 BROTHER(주)의 HS-350기종으로서 가공 범위 160×260mm, 최대 테이블 이송 속도 300mm/min, 와이어전극 이송 속도 20~120mm/sec, 사용 와이어전극의 지름은 0.1~0.3mm이며, 가공 전원은 트랜지스터 펄스 회로 방식으로 최대 방전 전류  $I_p$ 는 7.3~200A 사이의 10단계로 되어 있으며 최대극간전압 목표치  $V_g$ 는 40~80V이다.

또한 방전 주기의 측정은 Fig. 2와 같은 Digital storage oscilloscope(Tektronix 2230, 100MHz)와 Tektronix HC100 color plotter를 사용하였다.

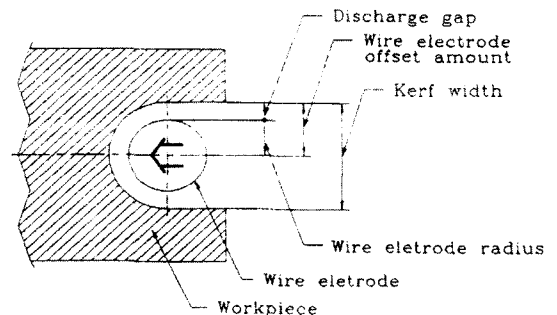


Fig. 1 Discharge gap in wire-cut EDM

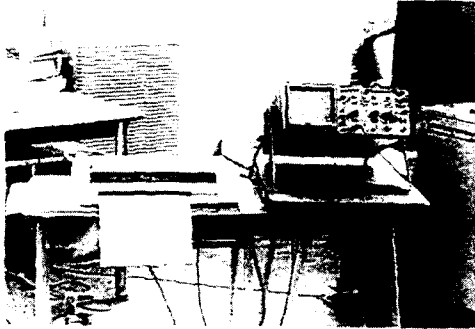


Fig. 2 Overall view of storage oscilloscope (Tektronix 2230)

2) 실험 재료

본 실험에 사용된 재료는 두께 20mm, 40mm, 60mm의 합금공구강(STD-11)과 초경합금(P-20)을 가로, 세로 각각 100mm의 정방형으로 가공하였으며, 이의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2, 3에 각각 나타내었다.

또한, 본 실험에 사용된 와이어 전극은 지름 0.25mm의 황동선 2중으로 이의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 4에 나타내었다.

3) 실험 방법

와이어 공급 속도와 장력을 각각 70mm/sec, 480g로 고정하였고, 가공액은 물을 사용하여 공작물의 상하 노즐로부터 각각 2l/min의 유량으로 분사하였으며 전기전도도는 45ms/cm로 고정하고 수온은 28 ± 1 °C를 유지하였다. 무부하 전압 V는 85V로 고정하였으며 최대 방전 전류 I<sub>p</sub>는 에너지 입력 단계에 따라 42~134A, 방전극간전압 목표치 V<sub>g</sub>는 55~75V 범위로 설정하여 자동 제어 방식으로 가공하였다.

본 실험에서는 방전극간전압 V<sub>g</sub>, 최대 방전 전류 I<sub>p</sub>, 방전 시간 T<sub>on</sub>, 와이어장력, 가공물 두께 등의 가공 조건이 방전간극 및 복현상 등의 가공 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of alloyed steel(STD-11)

Chemical composition (%)										Mechanical properties
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V		Hardness(Ha)
1.49	0.22	0.28	0.24	0.017	0.14	11.49	0.88	0.26		223

시험편의 가공은 20mm, 40mm, 60mm의 합금공구강과 초경합금을 Fig. 3과 같이 가로, 세로 각각 5mm의 정방형으로 가공하였다. 치수 측정은 1mm까지 측정 가능한 버니어마이크로미터를 이용하여 상중하 3개 부분의 치수를 측정하였으며 여기서, 측정오차는 ±4~5µm 정도 였으나 본 실험에서는 복현상의 크기를 0.01mm 단위로 나타내었으므로 무시하였다.

가공면거칠기는 SurfTester 501을 사용하여 임의의 3개 부분의 R<sub>max</sub>값을 측정하여 평균치를 나타내었다. 방전 주기의 측정은 Storage Oscilloscope를 이용하여 10µs, 20µs, 30µs의 단계를 각각 10회씩 plotting하여 평균치를 계산함으로써 충격계수와 주파수를 나타내었다.

4. 실험 결과 및 고찰

1) 방전 인자가 복현상에 미치는 영향

방전가공에 있어서 복현상(Hand drum form)의 발생 원인은 일반적으로 와이어의 진동모드에 의한 것이라고 생각된다. 보통의 가공에서는 피가공물 표면의 상하로 가공액을 분출하기 때문에 극간의 중간 부분이 방전에 의해 이온화되므로 비저항이 적게 되어 그 결과 복모양의 현상이 발생하는 것이라고 생각한다.

Table 2 Chemical composition of tungsten carbide(P-20) (%)

Co	TiC	TaC	TiCN	WC
9	19	9	5	58

Table 3 Mechanical properties of tungsten carbide(P-20)

Rockwell hardness(H <sub>RA</sub> )	92.5
Bending strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	240
Compressive strength(kgf/mm <sup>2</sup> )	480
Young's modulus(kgf/mm <sup>2</sup> )	54,000
Thermal expansion coefficient( ×10 <sup>-6</sup> /°C)	6.0
Heat conductivity (cal/cm · °C · sec)	0.08

Table 4 Chemical composition and mechanical properties of wire electrode

Chemical composition(%)					Mechanical properties	
Cu	Zn	Pb	Sn	Fe	Tensile strength(kg/cm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
63.04	36.86	0.03	0.02	0.05	100	2

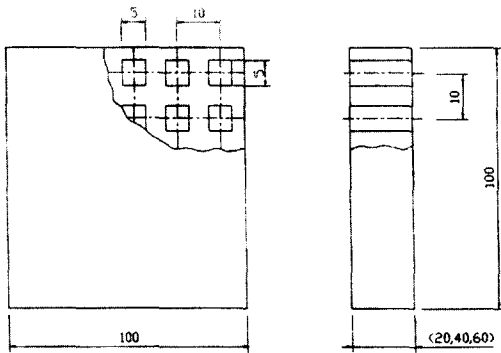


Fig. 3 Dimensions of workpiece

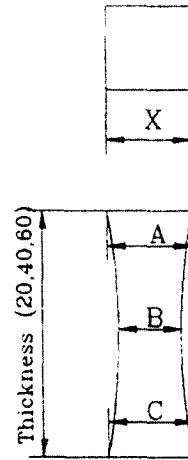


Fig. 4 Square column

복현상의 정도는 Fig. 4에서 X의 값을 측정함에 있어서 상부와 중간부의 치수의 차 즉 A-B의 값으로 나타내었다.<sup>(9)</sup>

Fig. 5는 방전극간전압의 변화에 따른 복현상의 치수 차이를 나타낸 것으로 방전극간전압이 낮을수록 복현상이 작게 생기고, 합금공구강 보다 초경합금이 훨씬 작게 일어남을 알 수 있다.

Fig. 6은 두께에 따른 복현상으로 두께가 두꺼워 질수록 span의 거리가 멀어져 와이어의 진동이 더 심해지고 가공물의 중간 부분에서 2차방전이 일어나 복현상이 현저히 증가하는 것으로 생각된다.

두께 20mm, 40mm에서는 합금공구강의 복현상이 크게 발생하였으나 두께 60mm에서는 역으로 초경합금의 복현상이 크게 발생하였다. 이것은 초경합금의 와이어방전가공에 있어서는 통상의 전기조건에서는 주성분인 탄화 텅스텐이 탈락, 양극산화 등 표면연화가 되어 균열이나 공동(Void)을 발생시켜 금형으로서 사용할 때 깨어지거나 이상마모의 원인이 되므로<sup>(10)</sup> 이 때문에 복현상이 현저하게 발생하는 것이라고 생각된다.

이것을 해결하기 위해서는 가공액의 비저항을 높이는 것이 유효할 것이다.

Fig. 7은 피가공물 두께별 방전 주기의 변화에 따른 복현상의 관계를 나타낸 것으로 방전시간이 길수록, 즉 방전 에너지가 커짐에 따라 복현상이 작게 발생하는 경향이며 방전 주기 10 $\mu$ s에서는 급격히 복현상이 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 충격계수(Duty factor)가 커지면서 절연회복이 완전히 이루어 지지 않으므로 같은 장소에 방전이 여러번 반복하여 발생하는 집중 방전 현

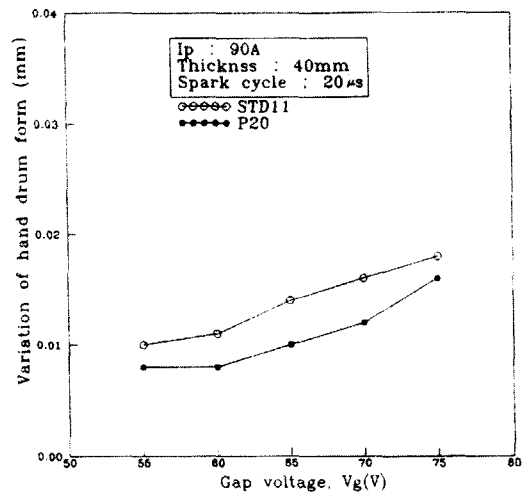


Fig. 5 Relationship between hand drum form and gap voltage

상이 발생하기 때문이라고 생각된다.

피가공물의 두께가 작을수록 복현상은 현저하게 작아 짐도 알 수 있고, 두께 20mm의 합금공구강이나 초경합금은 복현상의 변화가 극히 미세함을 알 수 있으나 동일 두께에 대해서는 합금공구강에 비해 초경합금의 경우, 복현상이 작음도 알 수 있다.

Fig. 8은 와이어의 장력에 따른 복현상의 변화를 나타낸 것으로 와이어 장력이 약할수록 복현상이 커진

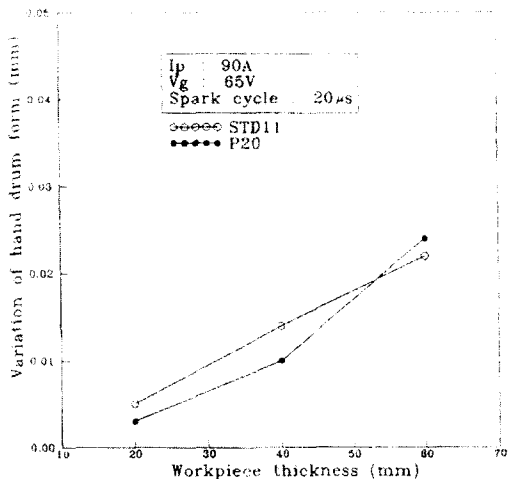


Fig. 6 Relationship between hand drum form and workpiece thickness

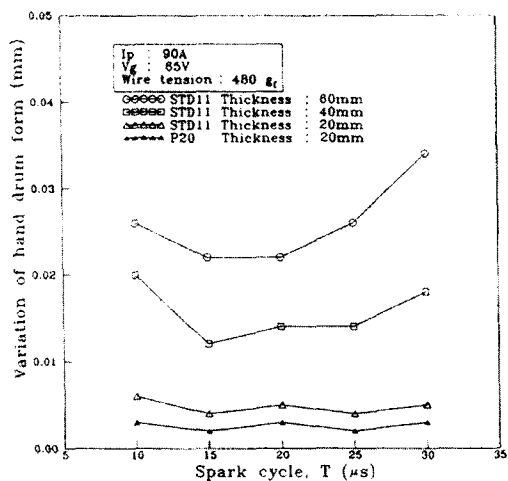


Fig. 7 Relationship between hand drum form and spark cycle

다. 이것은 와이어의 떨림에 의하여 진폭이 커지기 때문이다. 장력이 증가할수록 복원상은 작아지나 와이어 단선이 되기 쉬워진다.

복원상을 줄이기 위한 2차 가공의 가공 조건을 나타낸 것이 Table 5이다.

Fig. 9는 가공 횟수에 따른 복원상의 상태를 나타낸 것으로 2차 가공시 복원상이 급격히 줄어들었으나 3차 가공에서는 약간 줄어들었으며 4차 가공에서는 변화가

거의 없음을 알 수 있다. 본 실험의 조건하에서 와이어 컷 방전 가공 능률을 향상시키기 위해서는 요구하는 정밀도와 형상 치수에 만족하는 범위 내에서 2차 가공으로 최종 마무리하는 것이 바람직하다고 생각한다.

## 2) 방전 인자가 방전간극에 미치는 영향

Fig. 1에서 도시된 바와 같이 방전간극(Discharge gap)은 (가공구폭-와이어 지름) / 2가 된다. 와이어 컷

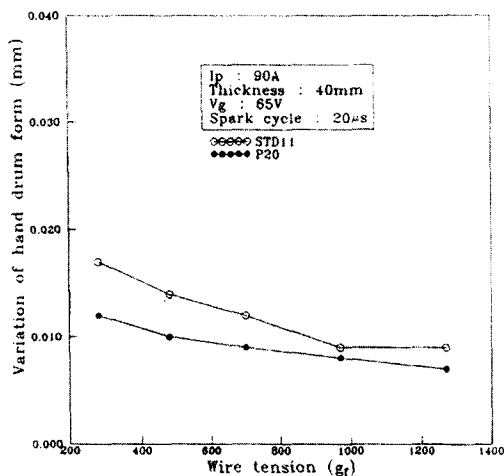


Fig. 8 Relationship between hand drum form and wire tension

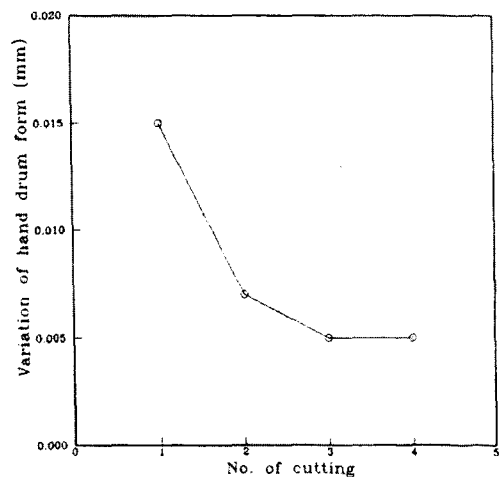


Fig. 9 Relationship between hand drum form and No. of cutting

Table 5 Cutting conditions

No. of cutting	1	2	3	4
Cutting speed (mm/min)	0.55	0.2	0.2	0.15
Peak discharge current (A)	90	14	14	13
Spark cycle (μs)	15	15	15	20
Wire speed (m/sec)	75	75	75	100
Wire tension (gf)	480	970	970	970
Flushing Top/Bottom (2/min)	20/10	10/10	10/10	10/10
Offset (mm)	0.2	0.18	0.18	0.136
Water conductivity (μs/cm)	45			
Workpiece	STD11			
Workpiece thickness (mm)	40			
Work temperature (°C)	24			

방전가공기를 이용한 초정밀 가공에서 가공 치수의 정밀도에 영향을 주는 인자로서는 가공 속도, 방전극간전압, 와이어장력, 방전 전류 펄스폭, 가공액 전도도등 여러 가지가 있다.

제반 조건들이 최적의 상태로 결정되었을 때 요구되는 치수 정밀도를 얻기 위해서 마지막으로 고려해야 하는 것이 방전극간극으로써 가공 조건에 따라 얼마나 정확하게 계산할 수 있는가에 따라 가공 치수 정밀도가 결정되는 것이다. (11)

Fig. 10은 두께별 최대 방전 전류의 변화에 따른 방전간극을 나타낸 것으로 두께가 두꺼울수록 방전간극이 다소 커지며 최대 방전 전류의 증가에 비례하여 방전간극이 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 11은 두께별 방전 주기의 변화에 따른 방전간극을 나타낸 것으로 방전 주기에 관계없이 거의 일정하게 유지됨을 보여주며 합금공구강 20mm, 40mm, 60mm, 초경합금 20mm 모두 보통의 조건으로 가공할 경우 방전간극은 4/100~5/100mm 범위 내에 포함됨을 알 수 있다. 같은 조건의 경우 합금공구강 보다 초경합금의 방전간극이 1/100mm 정도 더 크다.

Fig. 12는 방전극간전압의 변화에 따른 방전간극을 나타낸 것으로 방전극간전압이 작아질수록 미소하게 방전간극이 작아짐을 볼 수 있다.

Fig. 13은 와이어 장력에 따른 것으로 장력이 증가할수록 방전간극은 작아지므로 방전이 안정된 범위에서 최대한 장력을 크게 하는 것이 바람직하다.

### 5. 결 론

와이어컷 방전가공에서 합금공구강과 초경합금을 대상으로 여러 가지 방전 인자가 복현상 및 방전간극에

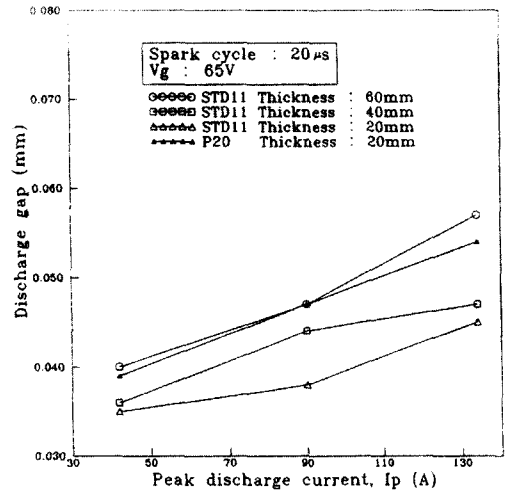


Fig. 10 Relationship between discharge gap and peak discharge current under various work-piece thickness.

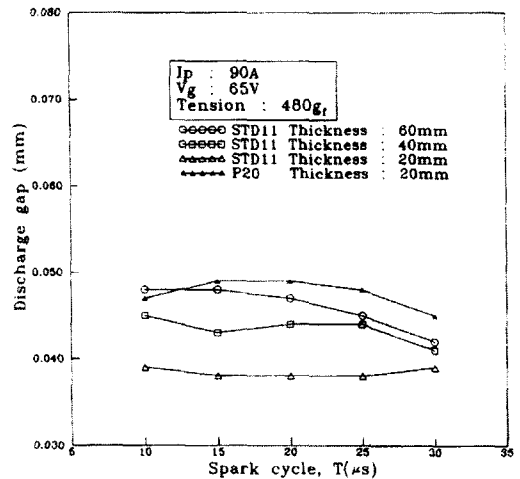


Fig. 11 Relationship between discharge gap and spark cycle

미치는 영향을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① 복현상은 방전극간전압과 방전 주기가 작고, 두께가 얇고, 와이어장력이 크며, 가공 횟수를 많이 할수록 줄어든다.

② 두께 60mm의 초경합금을 보통의 조건으로 가공하면 전해 작용에 의해 결합제인 코발트가 용출되어 주 성분인 탄소 텅스텐이 탈락되어 복현상이 커지므로 전

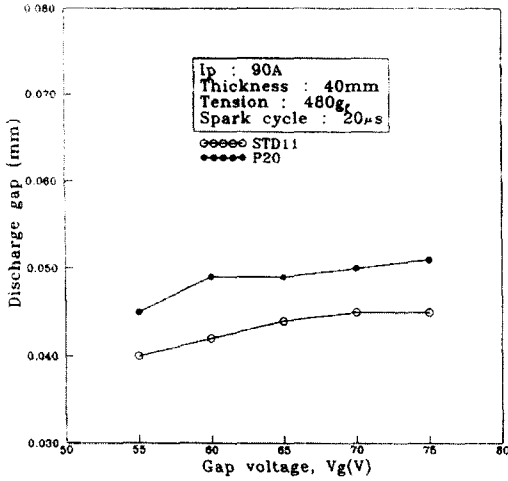


Fig. 12 Relationship between discharge gap and gap voltage

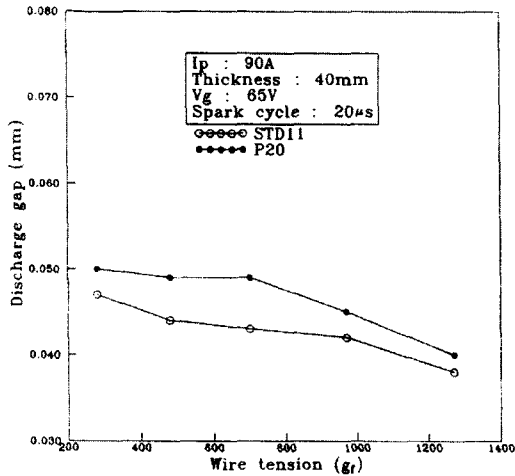


Fig. 13 Relationship between discharge gap and wire tension

도도를 낮게 하여야 한다.

③ 방전간극은 최대 방전 전류와 방전극간전압이 크고, 와이어장력이 작을수록 미세하게 커지고, 방전 주

기에는 거의 영향이 없다.

④ 보편적인 방전간극은 4/100 ~ 5/100mm 정도이며 같은 조건의 경우 합금공구강보다 초경합금의 방전간극이 1/100mm 정도 더 크다.

### 참고문헌

1. 와시노엔지니어링로그, 大關秀明, “ワイヤ放電加工の高精密度化技術”, 機械技術, Vol.20 No.3, pp.60~64, 1993.
2. 野田容徳, “放電加工機の自動化, 無人化”, 精密工學會誌, 6, pp.40~44, 1991.
3. 増井清徳, 曹根 匠, “放電加工面の性狀と高品位化”, 精密工學會誌, 6, pp.13~16, 1991.
4. 日立精工株式會社, 菅原 敏, “ワイヤ放電加工機による高精度加工”, プレス技術, Vol.22 No.7, pp.64~68, 1984.
5. Brother Industries, LTD: Wire E.D.M HS-350 Instruction Manual, pp.9~24, 1989.
6. 유재구, 방전가공, 대광서림, p.79, 110, 1992.
7. 井上潔 著, 放電加工의 實際와 應用, 圖書出版 技多里, p.90~91, 1990.
8. 齊藤長男, “放電加工 메카니즘”, 精密機械, Vol.29 No.10, pp.17~26, 1963.
9. B. M. Schumacher, “EDM Technology for Precise Workpieces with Excellent Surface Quality”, Ann. ISEM-7, p.126, 1983.
10. 김창호 編著, 放電加工, 機電研究社, p.292, 1992.
11. Tadao Tsutsui, “Study on the Electric Discharge Grinding (2nd Report). -on the Electric Discharge Power-”, JSPE, Vol.30 No.3, pp.259~265, 1964.