

와이어 방전가공에서 가공조건에 대한 방전갭 크기 고찰
이건범*, 최태준*, 이세현**, 손일복***, 이성용****, 한상희*****

Consideration of the Clearance According to the Wire Electrical Discharge Machining Conditions

K.B. Lee*, T.J. Choi*, S.H. Lee**, I.B. Son***, S.Y. Lee****, S.H. Han*****

*홍성기능대학, **대전기능대학, ***대구기능대학, **** 부산기능대학, *****인천기능대학

Abstract

Wire electrical discharge machining (WEDM) is one of the unconventional machining processes, which is utilizing electrical energy to remove work-piece. In recent years WEDM used widely in die-sinking industry because WEDM can machine any hard materials if only it has conductivity and can machine accurately to the complex geometry, for fine wire is used in WEDM for the tool electrode. However WEDM is non-contact machining process, which is utilizing discharge phenomena occurring between two electrodes, the size of the machined part is larger than that of the tool electrode size. It is called discharge gap or clearance the difference size between the tool electrode and the machined part in WEDM.

By the experiment clearances according to the machining condition was investigated.

Key words: WEDM (Wire Electrical Discharge Machining), Clearance, machining condition

1. 서론

과학기술의 발달과 더불어 자동차, 우주항공, 의료기기 등과 같은 첨단 산업분야에서는 기계적 성질이 우수한 신소재를 정밀하게 가공할 수 있는 방법이 점점 필요하게 되었다. 이에 따라 복잡한 형상을 고정밀도로 가공할 수 있는 와이어 방전가공법이 개발되어 널리 사용되고 있다.

일반적으로 방전가공은 형조방전과 와이어 방전으로 분류하는데, 와이어 방전가공은 난삭성 재료에 대한 가공성이 우수하고 공구로 사용되는 와이어의 크기가 매우 작으므로 미세한 형상도 정밀하게 가공할 수 있으므로 우주항공과 자동차산업의 부품가공 및 형조방전기용 전극가공에 폭 넓게 사용되고 있으며 앞으로도 점점 적용범위가 넓어질 것으로 기대된다^(1,2,3).

와이어 방전가공의 특성은 전극의 소모로 인해 문제가 되는 형조방전과는 달리 소모된 와이어 전극이 회수되고 항상 새로운 와이어가 전극으로 사용되므로 전극의 소모를 고려하지 않아도 된다. 그러나 와이어 방전가공은 공구와 공작물이 접촉되어 가공되는 절삭가공과 달리 공구전극과 공작물사이에서 발생하는 아크방전에 의해 가공되는 비접촉 가공이므로 가공폭이 공구전극의 크기보다 항상 크게 된다. 가공된 공작물의 폭과 공구전극의 크기와의 차를 클리어런스 또는 방전갭이라 하는데 방전갭의 크기는 방전가공조건에 따라 다르므로 고정밀도를 유지하기 위해서는 방전가공조건과 방전갭의 크기와의 관계를 정확하게 예측할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 실험을 통하여 와이어 방전가공 에너지를 결정하는 피크전류치, 펄스온타임, 휴지 시간을 변화시켜 이에 대한 방전갭 크기와 이론 실험식을 이용하여 구한 방전갭과의 관계를 고찰하였다.

2. 와이어 방전가공에서의 전기적 인자

와이어 방전가공은 전기적 에너지를 이용한 가공법이므로 방전가공에 적용된 전기적 인자에 의해 가공성능이 결정된다. 와이어 방전가공에 영향을 미치는 전기적 인자는 매우 많으나 본 실험에 적용된 A320 모델에서 설정할 수 있는 전기적 인자와 그 영향은 다음과 같다.

(1) 펄스온타입 τ_p

펄스온타입은 극간에 전압이 인가되는 시간으로 펄스온타입이 큰 값으로 설정되면 방전에너지가 커지게 된다.

Table 1. Condition table of pulse on time

$I_p \geq 16$		$I_p \leq 15$			
No	τ_p	No	τ_p	No	τ_p
0	100ns	0	0.5 μ s	10	0.5 μ s
1	200	1	1.0	11	1.0
2	300	2	1.5	12	1.5
3	400	3	2.0	13	2.0
4	500	4	2.5	14	2.5
5	600	5	3.0	15	3.0
6	700	6	3.5	16	3.5
7	800	7	4.0	17	4.0
8	900	8	4.5	18	4.5
9	1 μ s	9	5.0	19	5.0

(2) 펄스오프타임 (휴지시간) τ_r

펄스오프타입은 극간에 인가되는 전압을 차단하는 시간으로 펄스오프타입이 큰 값으로 설정되면 방전이 발생하는 간격이 길어지므로 방전에너지가 작아지게 된다.

Table 2. Condition table pulse off time

No	τ_r	No	τ_r	No	τ_r
0	1.0	11	6.0	22	16.0
1	1.0	12	6.5	23	17.0
2	1.5	13	7.0	24	18.0
3	2.0	14	8.0	25	19.0
4	2.5	15	9.0	26	20.0
5	3.0	16	10.0	27	21.0
6	3.5	17	11.0	28	22.0
7	4.0	18	12.0	29	23.0
8	4.5	19	13.0	30	24.0
9	5.0	20	14.0	31	25.0
10	5.5	21	15.0		

(3) 피크전류치 I_p

피크전류치는 전류의 최대 값을 나타내는 인자이다. 단발방전에너지는 거의 피크전류치 I_p , 주전원전압 V , 펄스온타입 ON에 의해 결정된다.

I_p 설정값 :

I_p 가 16 또는 17일 경우 : 황삭가공

I_p 가 0-15, 16 : 사상가공

Table 3. Condition table peak current

I_p	전류(A)	I_p	전류(A)
1	0.8	9	7.2
2	1.6	10	8.0
3	2.4	11	8.8
4	3.2	12	9.6
5	4.0	13	10.4
6	4.8	14	11.2
7	5.6	15	12
8	6.4		

(4) 보조전원 회로 HP

보조전원회로 HP는 I_p 가 16 이상인지 15 이하인지에 따라 그 기능이 다르다.

■ $I_p \geq 16$ 일때

H : 고전압회로를 선택한다. H는 황삭가공에서는 좀처럼 사용되지 않으며 보통 0으로 설정한다.

P : 불안정한 가공이 이루어지는 동안의 펄스온타입 기간을 설정한다. P는 가공조건에 의해 결정된 값보다 큰 경우에는 방전기간 설정에 사용하지 않는다.

■ $I_p \leq 15$ 일때

H : 고전압회로를 선택한다.

P : 사용되지 않는다.

Table 4. Condition table of auxiliary power supply

H	P	펄스폭
	0	100ns
	1	200
	2	300
	3	400
	4	500

(5) 펄스오프타임 조정 MA

HP와 마찬가지로 MA는 I_p 값에 따라 기능이 다르다.

■ $I_p \geq 16$ 일 때 :

M : 가공상태의 불안정한 정도를 탐색하는 레벨을 설정하는 인자이다(0~9).

A : 불안정한 상태로 가공되는 동안의 펄스오프타임을 설정한다(0~9).

A를 큰 값으로 설정하면 가공안정성이 증가하고 와이어가 절단될 가능성이 감소한다.

■ $I_p < 15$ 일 때 :

M : 가공상태의 불안정한 정도를 탐색하는 레벨을 설정하는 인자이다.

A : 가공이 불안정한 기간동안 펄스오프타임의 스케일팩터(scale factor)를 설정하는 인자이다. A를 큰 값으로 설정하면 펄스오프타임의 스케일팩터가 증가한다. 결과적으로 가공속도는 감소하지만 가공안정성은 높아진다.

(6) 서보 참조전압 SV

SV는 전극과 가공물의 간격을 설정하기 위한 함수로 와이어 가공위치에서의 전압을 설정하는 인자이다. Fig.1과 같이 SV를 높은 값으로 설정하면 평균가공 전압이 증가하여 결과적으로 가공안정성이 높아지지만 와이어와 가공물의 간격이 멀어지게 되므로 가공속도가 저하된다.

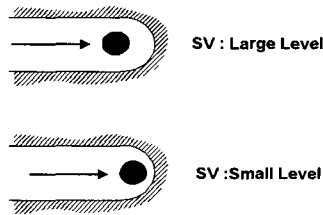


Fig.1 Distance between electrode and work-piece according to the SV

Table 5. Condition table of MA

$I_p \leq 15$			$I_p \geq 16$		
M	A	off 배율	M	A	off time
	0	X6		0	4 μ s
	1	X7		1	5
	2	X8		2	6
	3	X9		3	7
	4	x11		4	8
	5	x13		5	9
	6	x16		6	10
	7	x21		7	15
	8	x32		8	20
	9	x64		9	25
		접촉레벨			검출폭
0	0	검출안됨	0		0.5 μ s
1		↑ ↓	1		1.5
2			2		2.5
3			3		3.5
4			4		4.5
5			5		5.5
6			6		6.5
7			7		7.5
8			8		8.5
9			검출잘됨	9	

(6) 주전원 전압 V

주 전원전압 V는 인가되는 주 전원 전압으로 I_p 와 함께 방전펄스 에너지를 결정하는 중요한 인자이다.

황삭 : 03

사상과 가는 와이어 직경 : 00-02

Table 6. Condition table of main power supply voltage

V	전압
0	60V
1	80V
2	100V
3	270V

(7) 서보 속도 SF

서보속도 SF는 서보 참조레벨의 방전갭 전압을 유지시키기 위하여 테이블이 이송하는 속도이다.

Table 7. Condition table of servo reference speed

SF	이송속도 mm/min
0	40.0
1	30.0
2	20.0
3	15.0
4	10.0
5	7.5
6	5.0
7	4.0
8	3.0
9	2.0

3. 실험장치의 구성 및 방법

3.1 실험장치 및 가공물

본 실험에 사용된 와이어 방전가공기는 일본 Sodick 사의 수치제어장치를 내장한 대우중공업의 A-320 모델이며, 가공액은 탈이온수를 사용하였다. 사용된 와이어 전극의 직경은 $\phi 0.25\text{mm}$ 의 황동 와이어를 사용하였으며, 가공물은 SUS304 를 사용하였다. 본 실험에 적용된 실험장치의 개요도는 Fig.2 와 같다.

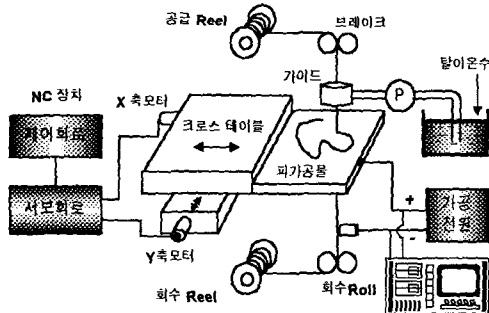


Fig.2 Schematic diagram of experimental equipment

가공조건은 피크전류치를 10, 14, 16, 17 번을 사용하였고, 펄스온타임은 3, 5, 7, 9 번을 사용하였으며 휴지시간은 7, 11, 14, 16 번을 사용하여 총 16 가지 가공조건으로 가공 하였다.

3.2 실험방법

가는 와이어를 공구전극으로 사용하였으며, 이 와이어에 일정한 장력을 준 상태로 감으면서 공구

전극인 와이어와 가공물 사이에 인위적으로 방전을 발생시켜 이때 생성된 방전에너지를 이용하여 실패식으로 가공하였다.

본 실험에서는 와이어장력, 와이어속도, 가공액 순환압력 및 분사압력 등을 일정하게 유지하고 방전에너지와 관련 있는 피크전류치, 펄스온타임, 휴지시간을 변화시켜 방전에너지의 크기와 방전갭 크기와의 관계를 조사하였다. 가공은 전극(-)을 음극으로 하고 가공물이 양극(+)이 되도록 정극성 가공을 하였다. 본 실험에 적용된 방전가공조건은 Table 8 과 같다.

Table 8 Experimental condition of WEDM

No	τ_p	τ_r	I_p	HP	MA	SV	V	SF	C
1	3	7	10	001	17	02	03	04	00
2	5	11	10	001	17	02	03	04	00
3	7	14	10	001	17	02	03	04	00
4	9	16	10	001	17	02	03	04	00
5	3	7	14	001	17	02	03	04	00
6	5	11	14	001	17	02	03	04	00
7	7	14	14	001	17	02	03	04	00
8	9	16	14	001	17	02	03	04	00
9	3	7	16	001	17	02	03	04	00
10	5	11	16	001	17	02	03	04	00
11	7	14	16	001	17	02	03	04	00
12	9	16	16	001	17	02	03	04	00
13	3	7	17	001	17	02	03	04	00
14	5	11	17	001	17	02	03	04	00
15	7	14	17	001	17	02	03	04	00
16	9	16	17	001	17	02	03	04	00

실험은 공구전극으로 황동와이어($\phi 0.25\text{mm}$)를 사용하였고 가공물은 SUS304 를 사용하였으며 방전갭의 변화를 충분히 측정할 수 있도록 각각의 방전가공조건에 대하여 10mm 씩 가공하였다.

본 실험에 적용된 와이어 방전기 A-320 모델에서는 I_p 16 번과 17 번에 대한 피크 전류치가 제시되지 않았으므로 I_p 16 번과 17 번의 피크전류값은 펄스온타임 기간동안 전극과 가공물사이에 흐르는 평균전류값을 오실로스코프로 측정하였다.

본 실험에서는 방전갭의 크기를 정확하게 측정하고 가공면 상태를 측정하기 위하여 광학 주사식 전자현미경인 SEM 장비를 이용하여 200 배 확대

촬영하였으며 측정된 결과와 이론실험식에 의해 예측된 값을 비교하였다.

본 연구에서 적용된 가공면 거칠기와 편측 방전갭에 대한 이론 실험식은 다음과 같다^(4,5).

$$R_{\max} \approx 1.6 \cdot I_p^{0.43} \cdot \tau_p^{0.38} \quad (1)$$

$$C_{1/2} \approx 3.7 \cdot R_{\max} \cdot 0.9 \quad (2)$$

4. 실험결과 및 고찰

Table 9는 방전가공에 적용된 16 가지의 가공조건으로 가공한후 전극과 가공된 가공물과의 편측 방전 갭(clearance) $C_{1/2}$ 를 나타낸 것이며 Table 10은 이론실험식에 의해 추정된 편측 방전갭과 실제 실험을 통하여 얻은 편측 방전갭과의 오차를 분석한 것이다.

실제 실험조건은 16 가지로 분류하였으나 4, 8, 12, 16 번의 경우는 가공이 매우 불안정하여 가공도중 가공조건을 임의로 변경하였으므로 데이터 분석에서 배제 하였다. 실험조건 9번부터 16번까지의 I_p 값은 기계 제작사에서 제공하지 않았으므로 오실로스코프로 측정한 결과 I_p 번호 16번인 9번부터 12번은 350A로 측정되었으며, I_p 번호 17번인 13번부터 16번은 500A로 측정되었다. I_p 측정에서 펄스온타임이 0.4 ~ 0.8 μs 로 매우 짧고 파형의 변화가 극히 심하여 측정된 값의 신뢰성에 문제가 있다고 할 수 있으므로 9번부터 16번까지의 연구결과를 참고로 표기하였다.

Fig.3은 피크전류 I_p 를 8A로 설정하고 펄스온타임을 2, 3, 4 μs 로 변화하여 가공한 결과를 나타낸 것이다.

Fig.4는 피크전류 I_p 를 11.2A로 설정하고 펄스온타임을 2, 3, 4 μs 로 변화하여 가공한 결과를 나타낸 것이다.

Fig.5는 피크전류 I_p 를 350A로 설정하고 펄스온타임을 0.4, 0.6, 0.8 μs 로 변화하여 가공한 결과를 나타낸 것이다.

Fig.6은 피크전류 I_p 를 500A로 설정하고 펄스

온타임을 0.4, 0.6, 0.8 μs 로 변화하여 가공한 결과를 나타낸 것이다.

Table 9 Experimental results of clearance according to the various machining conditions

No	$\tau_p (\mu s)$	$\tau_r (\mu s)$	$I_p (A)$	$C_{1/2} (\mu m)$
1	2	4	10	13.5
2	3	6	10	15
3	4	8	10	20
4	5	10	10	
5	2	4	14	17.5
6	3	6	14	19.5
7	4	8	14	21.5
8	5	10	14	
9	0.4	4	16	33.5
10	0.6	6	16	40
11	0.8	8	16	49
12	1	10	16	
13	0.4	4	17	35
14	0.6	6	17	50
15	0.8	8	17	52.5
16	1	10	17	

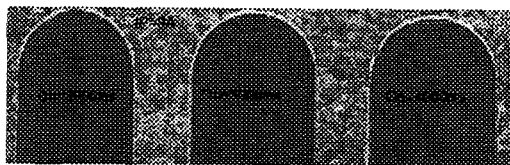


Fig.3 Machined results with peak current 8A and various pulse on-time

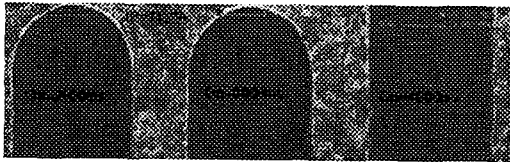


Fig.4 Machined results with peak current 11.2A and various pulse on-time

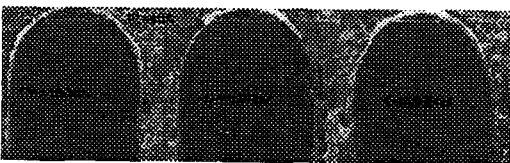


Fig.5 Machined results with peak current 350A and various pulse on-time



Fig.6 Machined results with peak current 500A and various pulse on-time

Table 10 Error analysis between estimated clearance and real clearance.

시험 번호	I_p (A)	τ_p (μs)	$C_{1/2}(Th)$ (μm)	$C_{1/2}(Re)$ (μm)	Error (μm)
1	8	2	16.01	13.5	2.51
2	8	3	18.39	15	3.39
3	8	4	20.29	20	0.29
5	11.2	2	18.24	17.5	0.74
6	11.2	3	20.95	19.5	1.45
7	11.2	4	23.11	21.5	1.61
10	350	0.4	39.81	33.5	6.34
11	350	0.6	45.77	40	5.77
12	350	0.8	50.50	49	1.50
13	500	0.4	45.74	35	10.74
14	500	0.6	52.55	50	2.55
15	500	0.8	57.98	52.5	5.48

실험결과 피크전류가 클수록 편측 방전갭의 크기가 커지고 피크전류가 동일할 경우에는 펄스온타임이 클수록 편측 방전갭이 크게 나타났다. 또한, 측정된 SEM 사진에 의하면 피크전류가 커질수록 가공면 거칠기가 거칠게 나타났으며, 피크전류가 동일할 경우에는 펄스온타임이 길수록 가공면 거칠기가 거칠게 나타났다.

본 실험에 적용한 이론실험식은 전극이 동(Cu)이고 가공물이 강(St)일 경우에 대한 편측 방전갭으로 실제 와이어 방전가공에서는 전극이 황동와이어이고 가공물이 SUS304 이므로 정확하게 일치하지는 않지만 Table 10 에서 볼 수 있듯이 실험결과와 거의 일치하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

황동과 SUS304 를 방전가공조건의 변화에 따라 와이어 방전가공하여 편측 방전갭을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 피크전류의 값이 클수록 방전갭의 크기는 크게 된다.
- (2) 펄스온타임이 길어지면 방전갭의 크기가 커지게 된다.
- (3) 이론실험식에 의하여 추정된 방전갭의 크기와 실제 방전가공에 의한 방전갭의 크기가 거의 일치한다.
- (4) 기계특성에 맞도록 이론실험식의 계수를 수정하면 가공조건의 변화에 대해서도 정확한 방전갭의 크기를 예측할 수 있다.

참고문헌

1. 김정석, 이득우, 강명창, 이기요, 성준경, 황경현, "황동과 금형강의 와이어 컷 방전가공을 통한 가공특성 평가", 한국공작기계학회지, 제 6 권, 제 4 호, pp.130~37, 1997
2. 이진범, 주상윤, 왕지남, "2 단계 신경망 추정에 의한 와이어 컷 방전가공조건 선정", IE interfaces, Vol.10, No.3, pp.125-132, 1997
3. 이진범, 주상윤, 왕지남, "와이어 가공조건 자동 생성 2 단계 신경망 추정", 한국정밀공학회, Vol.15, No.2, pp.7-13, 1998
4. 齊藤長男, 毛利尙武, 高鷲民生, 古谷政典, 放電加工技術, 日刊工業新聞社, 1997
5. 三菱電機(株), "放電加工のしくみと100%活用法", 技術評論社, 昭和 60 年