

방전에너지에 따라 동전극과 흑연전극이 방전가공면에 미치는 영향

최재용*, 전언찬**, 정재현***

Influence on EDM Surface with the Copper and Graphite Electrode According to the Discharge Energy

Jae-Yong Choi*, Eon-Chan Jeon**, Jae-Hyun Jeong***

ABSTRACT

This study has been performed to investigate MRR(metal removal rate), REW(relative electrode wear), surface roughness, heat transmutation layer and microhardness distribution in cross-section of the machined surface with various pulse-on duration and peak pulse current, using the copper and graphite electrode on the heat treated STD11 which is extensively used for metallic molding steel with the EDM.

The results obtained are as follows: a) There exists critical pulse-on duration(If I_p equals 5A, τ_{on} is 50 μs) which shows the maximum MRR in accordance with peak pulse current and the MRR decreases when the pulse-on duration exceeds the critical pulse-on duration because of the abnormal electric discharge. b) Safe discharge is needed to make maximum of MRR and the metallic organization must be complicated for discharge induction. c) Graphite has much more benefits than copper electrode when rapid machining is done without electrode wear. d) The most external surface has the highest microhardness because of carburizing from heat analysis of the dielectric fluid and the lower layer of the white covered layer has lower microhardness than base metal because of softening.

Key Words : Pulse-on duration(방전 펄스 폭), Peak pulse current(방전 전류 파고치), Discharge induction(방전 유발), Carburizing(침탄), EDM(Electric Discharge Machining), Heat transmutation layer(열변질층), Metallic molding steel(금형용강)

1. 서론

최근 재료의 성능에 대한 요구가 증가하고, 재래의 금속재료에서는 대응하기 어려운, 혹독한 사용 환경과 사용

조건에 견딜 수 있는 재료들이 많이 있다. 이들 재료들은 일반적으로 다이아몬드 스톨을 사용하여 연삭되고 있는데, 연마공정은 비용이 많이 들뿐만 아니라 앞 공정에서의 표면손상이나 정밀도 그리고 연마제거량의 관계에 따

* 한국해양대학교 대학원

** 동아대학교 공과대학 기계공학과

*** 한국해양대학교 기계냉동자동차공학부

라서 재료 강도가 충분히 회복되지 않는 일도 많다. 따라서 가공에 의한 표면 손상의 성질이나 정도를 파악하는 것이 중요하고, 복잡한 형상의 재료에 대한 가공비는 매우 높아 간편한 가공법의 확립이 요구되고 있다. 그래서 고경도 재료를 비교적 간단히 가공할 수 있는 방전가공법을 응용하는 것이, 와이어 컷 방전가공기를 중심으로 시도되어, 복잡한 형상의 가공에 대한 응용면에서 볼 때, 연삭가공 등과 비교하여 방전가공의 우수성이 나타나고 있다.⁽¹⁾

여러 가공법 중에서 방전가공이 두드러지게 특이한 점의 하나는 가공 단위(단위 제거 현상에 기초를 두는 제거량)가 주로 전기적인 모든 양에 의해 결정되는 점이다. 가공면의 거칠기가 장치의 구조나 동작과는 상관없이 가공전원에서 주는 방전펄스에 의해 정해진다. 그리고 전기적인 모든 양은 현재 광범위하게 변화시키는 것 중에 가장 용이한 물리량이라고 말할 수 있다. 그러므로 방전가공에서는 아주 작은 절삭깊이를 방전펄스에너지, 즉 방전펄스의 전류치와 펄스폭을 작게 함으로써 쉽게 실현할 수 있고 이것은 방전가공이 미세 가공에도 적용할 수 있음을 나타낸다.⁽²⁾

실제 방전가공에서는 에너지 공급시간이 일반적으로 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ sec 정도의 불꽃방전에 수반되는 짧은 아아크 방전현상을 이용하여 가공이 이루어지고 있다. 이 에너지 공급시간을 방전전류펄스폭(Pulse-on duration)이라고 하며, 방전전류과고치(Peak pluse current)와 함께 방전에너지를 나타내는 중요한 요소가 되고, 가공할 때의 모든 특성, 즉 공작물 가공량(MRR: Metal Removal Rate), 전극소모비(REW: Relative Electrode Wear) 및 표면조도 등에 큰 영향을 미치게 된다.

열처리한 STD11은 주로 Wire cut-EDM에 의한 가공 특성에 미치는 방전가공조건에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔으나⁽³⁾⁻⁽⁷⁾, Die sinking EDM에 의한 방전가공의 특성과 전극재료에 따른 최적의 방전가공조건에 대하여는 많은 연구의 필요성이 절실히 요구되고 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 사용되어 가공면의 개선에 대한 관심이 점점 높아지고 있다.⁽⁸⁾

따라서 본 연구에서는 CNC 방전가공기에서 동전극(Copper electrode)과 흑연전극(Graphite electrode)

으로 금형제품에 널리 사용되는 열처리된 STD11을 대상으로 가공조건, 즉 방전전류펄스폭 및 방전전류과고치를 변화시켜 이에 따른 공작물의 가공량, 전극소모비, 표면조도, 가공단면의 열변질층 및 경도변화 등 방전가공면의 성상을 관찰하여 두 전극의 특성을 비교 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 표면조도 $R_{max} = 0.5 \mu m$ 으로 일정하게 하였다.

그리고 전극재료는 $\phi 10 \times 150$ mm 순수동봉을 밀링머시인으로 단면가공하였고, 흑연전극은 에머리 페이퍼 #1000으로 연마하여 표면조도 $R_{max} = 0.5 \mu m$ 일정하게 하였으며, Table 3의 조건으로 각각 실험하였고, Table 4는 동전극과 흑연전극의 물리적 성질을 나타내었다.

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°C, 1hr O.C.	200 °C, 1hr A.C.	720

Table 3 Experimental conditions

Item	Unit	Conditions
Pulse-on duration	μs	20, 50, 100, 200, 400
Pulse-off duration	μs	20(constant)
Peak pulse current	A	5, 10, 15, 30
No-load voltage	V	90(constant)

Table 4 Mechanical properties of graphite and copper electrode

Item	Unit	Graphite electrode	Copper electrode
Density	g/cm ³	1.82	8.93
Flexural	kg/cm ²	590	3000
Resistivity	$\mu\Omega/cm$	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

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 볼 스크류에 의해 제어되어 이송이 매우 정밀할 뿐만 아니라 입력된 프로그램에 의해 정확한 가공치수의 설정이 가능하며, 항상 깨끗한 가공액을 가공탱크에 충만시키는 구조로 되어 있다. 그림에서 ①은 주축대, ②는 클램프이며, ③은 전극을 고정하기 위한 SNT콜렛전극홀더(SNT12: Sodick national taper)이고, ④는 전극이다. 그리고 ⑤는 시험편이고, ⑥은 정밀 바이스, ⑦은 테이블, ⑧은 가공탱크, ⑨는 가공액이다. ⑩는 방전에서 발생하는 분해가스, 가공칩, 탄화물 등을 배출시키기 위한 가공액 분사 노즐이며, ⑪은 서어비스 탱크, ⑫는 가공액 송출 펌프이다.

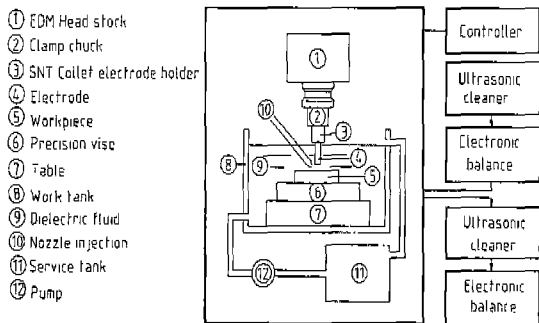


Fig.1 Experimental apparatus of EDM

2.3 실험방법

방전가공기의 SNT 콜렛전극홀더에 전극을 고정시키고, 시험편과 전극의 직각도를 검사한 후 역극성회로를 구성하여 방전현상에 영향을 주는 각 가공조건을 Table 3과 같이 변화시켜 동전극과 흑연전극을 같은 조건으로 실험하였다. 또한 실험에 사용한 가공액은 케로신(Kerosine : KOTON 600)이고 가공탱크내의 가공액 높이는 시험편의 상면으로부터 80 mm가 되도록 하였고, 가공부 위로부터 10 mm거리에서 가공액 분사 노즐을 통해 1 kg/cm²의 압력으로 가공액을 분사시켰다. 실험전 시험편을 에머리 페이퍼 #1000으로 정밀 연마하여 동전극과 함께 3분간 초음파 세정을 하고 건조시킨 후, 흑연전극은 24시간 방전가공액속에 넣어 두었다가 꺼내어 디지털 천칭으

로 시험편 및 전극의 중량 감소량을 측정하여 단위시간당 공작물 가공량과 전극소모비를 구하였다. 그리고 표면조도계로 가공면의 표면조도를 측정하였고, 가공면 및 수직 단면은 주사전자현미경과 광학현미경으로 사진 촬영하여 관찰하였다. 한편 방전가공면을 다이아몬드 커터로 수직 절단하고 단면조직을 사진촬영하여 가공단면의 열변질층을 조사하였고, 마이크로 비커스 경도계로 가공단면의 깊이 따른 경도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공작물 가공량과 방전에너지

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

Fig. 2는 펄스 휴지폭(Pulse-off duration)을 20 μ s로 일정하게 한후 방전펄스폭(τ_{on})을 20 μ s에서 400 μ s까지 단계적으로 변화시켰을 때의 방전전류과오차(I_p)에 대한 공작물 가공량을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 I_p 가 상승할수록, 그리고 τ_{on} 이 증가할수록 공작물 가공량은 증가한다. 그러나 I_p 가 5A인 경우 τ_{on} 이 50 μ s에서, 10A인 경우 100 μ s에서, 30A인 경우 200 μ s에서 공작물 가공량은 최대치를 나타내고, 그 이상의 τ_{on} 에

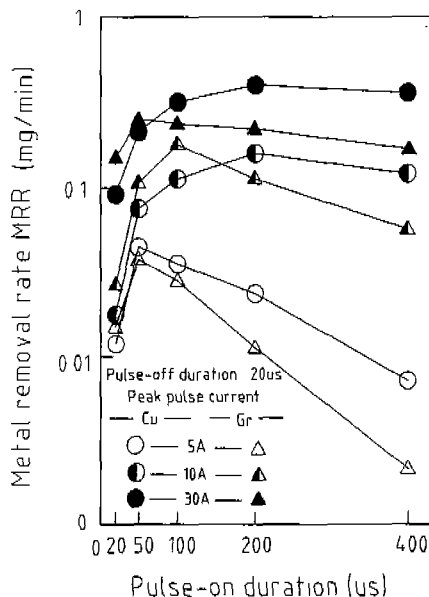


Fig. 2 Realation between metal removal rate and pulse-on duration

서는 가공량이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 펄스폭이 짧은 경우에 피크전류가 규정된 전류까지 도달하는데 시간이 걸리기 때문에 지정된 I_p 에 까지 참 I_p 값이 도달하지 못하기 때문에 가공량이 감소하는 것이라고 생각된다. 역극성 회로를 사용하여 동전극으로 강을 가공할 경우의 전류밀도는 다음과 같이 표시된다.⁹⁾

$$J_{st(-)cu(+)} = I_p / (\pi/4) (2.4 \times (\tau_{on})^{0.4} \times I_p^{0.4})^2 = 0.22(I_p)^{0.2} / (\tau_{on})^{0.8} (A/cm^2) \quad (1)$$

즉 τ_{on} 이 증가할수록 전류밀도(J)는 작아진다. 따라서 펄스폭이 길수록 가공속도가 저하되는 것은 전류밀도가 낮아짐에 따라 방전압력이 낮아지기 때문에 용융금속을 충분히 비산시킬 수 없어서 용융금속의 일부가 다시 응고하여 가공표면에 재응고층을 형성하므로 가공속도가 떨어지고 불안정한 상태로 되기 때문이라고 생각된다. 또한 피크전류가 높아지면 보다 긴 펄스폭에서 가공속도가 떨어지기 시작하는데 방전압력은 에너지에 비례하여 에너지 밀도가 높은 쪽이 강하게 되기 때문¹⁰⁾이라고 생각된다.

동전극과 흑연전극의 가공량을 비교해 보면, 방전펄스폭 50 μs 이하에서는 동전극에 비해 흑연전극을 사용했을 때 가공속도가 높게 되는데, 이것은 가공면적이 적을수록 방전이 집중되기 쉽기 때문에 가공속도를 최대로 발휘하기 위해서는 가공의 안정이 필수적이고 방전을 분산시키는데 필요한 방전유발¹¹⁾을 위해서는 조직이 치밀해야 하는데 동전극에 비해 흑연전극이 우수하고 내열성이 높기 때문이라고 생각된다. 그러나 그 이상에서는 동전극의 가공속도가 높아지는데, 이것은 펄스폭의 증가에 따라 전류밀도가 작아지며 전기저항이 큰 흑연전극의 방전에너지가 상대적으로 더 낮아지기 때문이라고 생각된다.

Fig. 3은 같은 조건에서 공작물의 표면조도를 나타낸 것이다. 전극과 공작물사이에서 일어난 방전흔(crater)의 중첩깊이의 평균값이 면거칠기이고, 방전흔의 생성에 영향을 미치는 인자는 공작물과 전극재료의 물리적 기계적성질, 가공액의 물리적 성질과 가공액의 분출압력, 방전에너지의 크기 등이 있다.¹⁰⁾ 그림에서 보는 바와 같이 τ_{on} 이 커지거나 I_p 값이 커지면, 즉 방전에너지가 커지면 표면조도는 증가한다. 이러한 현상은 낮은 펄스폭에서 I_p 값의 증가에 따라 전류밀도가 증가하기 때문이며, 펄스폭이 큰 경우에는 방전주가 짧고 방전면적이 넓어져 보다 넓은 범위의 파괴현상을 가져오게 되며 전류밀도가 감소하여 열의 영향을 받는 범위가 넓어지기 때문¹¹⁾이라고 생

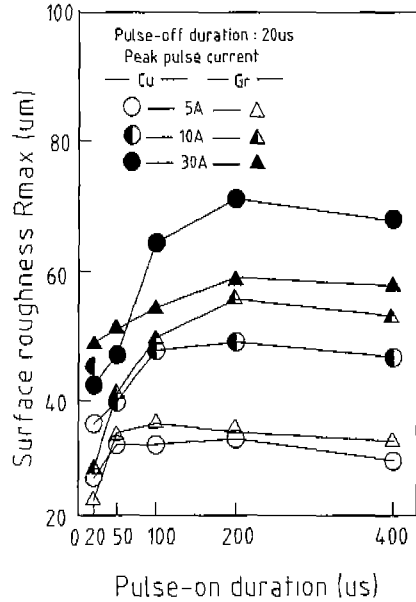


Fig. 3 Variation in surface roughness with pulse-on duration

각된다. 그리고 τ_{on} 이 짧은 다듬질영역에서의 흑연전극은 전극재료 자체의 치밀도가 가공면에 전사되므로 표면조도가 동전극에 비해 좋게 나타나고 있다. 그러나 τ_{on} 50 μs 이상에서는 오히려 동전극의 표면조도가 좋게 되는데, 이것은 τ_{on} 의 증가에 따라 전류밀도가 작아지고 전기저항이 흑연전극보다 적기 때문에 방전에너지가 상대적으로 높아져 칩의 비산이 잘 이루어지기 때문이라고 생각된다.

Fig. 4는 I_p 가 10A이고 τ_{on} 이 20 μs , 100 μs , 400 μs 일때 동전극을, Fig. 5는 같은 조건에서 흑연전극의 방전가공면을 찍은 사진이다. Fig. 4와 Fig. 5에서 방전 펄스폭의 증가에 따라 방전흔의 직경도 커지는데 펄스폭이 400 μs 인 경우 이상방전으로 인해 방전흔 주위에 crack이 형성되어 있는 것을 알 수 있고 이것은 용융물이 냉각

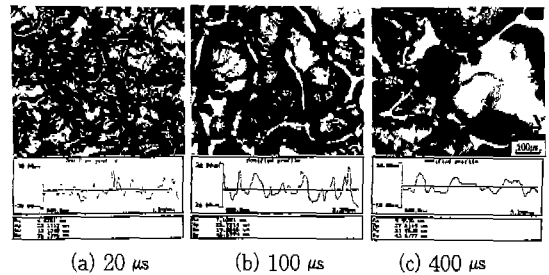


Fig. 4 Photo. of the EDM surface on variation of pulse-on duration with copper electrode ; $I_p = 10A$

속도의 영향을 받은 결과라고 생각된다. 그리고 Fig. 4의 (a)와 Fig. 5의 (a)를 비교해 보면 동전극에 비해 흑연전극의 방전점의 이동이 매우 조밀하여 표면조도가 좋게 됨을 알 수 있다. 또한 방전흔의 직경은 흑연전극 가공면이 동전극 가공면 보다 크게 형성되는데 양호한 표면조도를 얻기 위해서는 흑연전극이 동전극을 사용했을 때보다 가공칩의 충분한 비산을 위하여 큰 방전에너지가 필요하다는 것을 알 수 있다.

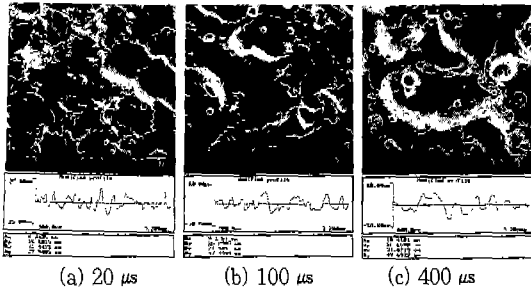


Fig. 5 Photo. of the EDM surface on variation of pulse-on duration with graphite electrode ; $I_p=10A$

3.2 전극 소모비

전극소모에 대해서는 방전에너지의 배분이라든가 전기적인 성질 만으로는 설명할 수 없다. 가공중 일정한 조건이 되면 공작물의 칩이 가공전극측에 정착하고, 이것은 방전하고 있는 가공전극을 덮어서 하나의 층을 형성하게 되며, 이 방전도금층을 만드는 과정은 개개의 방전현상과는 전혀 다른 현상을 일으킨다고 생각된다.

Fig. 6는 방전펄스폭에 대한 전극소모비를 나타낸 것이다. 여기서 전극소모비는 다음의 관계로 부터 계산하였다.

$$REW = \frac{W_t}{W_p} \times 100(\%) \quad (2)$$

- 여기서 REW : 전극소모비 (%)
- W_t : 전극의 소모중량 (g)
- W_p : 공작물의 소모중량 (g)

전극소모비는 대략 30 %정도의 소모비보다 클 경우에는 안정되지 않는다. 이것은 가공중에 발생한 분해된 그라파이트의 결정성능과 칩의 혼입률, 그리고 칩의 입자크기 등에 의하여 전극표면의 피복성이 변화하기 때문이라고 생각된다.⁽¹¹⁾ 방전펄스폭의 증가에 따라 전극소모비도

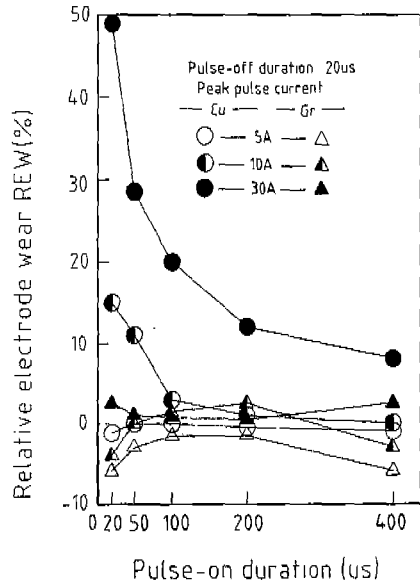


Fig. 6 Relation between relative electrode wear and pulse-on duration

증가하고 200 μs 이상에서는 오히려 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 가공액이 열분해되어 생긴 탄화물이 전극에 부착되고, 이탄화물과 공작물사이에서 방전이 계속되기 때문이라고 생각되며, 이러한 조건에서는 전극의 방전점이 넓고 전류밀도가 저하하여 양극 표면으로부터의 침적물이 파손되지 않기 때문이라고 생각된다. 그리고 동전극에 비해 흑연전극의 소모비가 적게 나타나는데, 이것은 결정과 결정의 경계는 방전 때 열피로가 생겨 탈락되어 소모되는데 열전도율이 낮아 열피로가 작고, 조직이 치밀하고 용접과 비열이 높으며 분해 탄화물과의 친화력이 크기 때문이라고 생각되고 많은 탄화물이 전극에 부착하여 (-)의 전극소모비가 존재한다고 생각된다.

Fig. 7은 I_p 가 10A이고 τ_{on} 이 20 μs , 400 μs 일 때 방전가공후의 동전극면을, Fig. 8은 같은 조건에서의 흑연

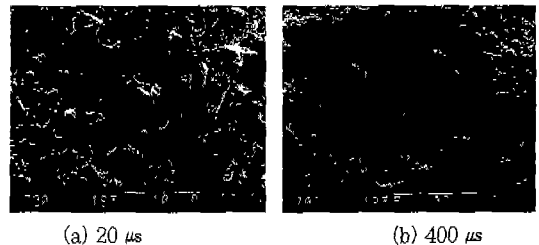


Fig. 7 Photo. of copper electrode surface on variation of pulse-on duration; $I_p=10A$

전극면을 찍은 사진이다. Fig. 7의 (a)와 Fig. 8의 (a)와 같이 펄스폭이 작은 경우는 방전흔이 좁으며 전극면에 공작물의 미세한 칩이 전면에 걸쳐 부착되어 있는 것을 볼 수 있으나, Fig. 7의 (b)와 Fig. 8의 (b)와 같이 펄스폭이 큰 경우는 방전흔이 매우 넓게 확장되어 있고 부분적으로 미세한 칩과 카본의 결정화가 약간 덜된 상태인 그래파이트 카이본이 피복되어 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 흑연전극은 동전극에 비해 방전펄스폭에 따른 방전흔의 차이가 적고 크기도 작는데 이것은 흑연전극의 조직이 치밀하고 비점이 높아 내열성이 우수하기 때문이라고 생각되며 분해탄화물이 전극면의 오목부위에 많이 침착해 있는 것을 볼 수 있다.

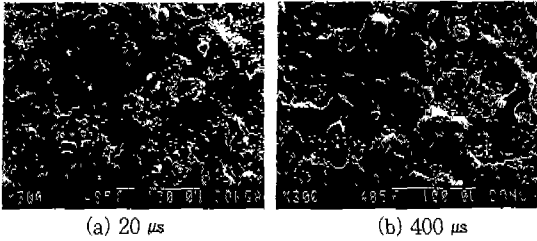


Fig. 8 Photo. of graphite electrode surface on variation of pulse-on duration: $I_p=10A$

3.3 방전가공면의 표면성상

방전가공은 가공액중에서 방전에 의한 고온, 고압을 이용하여 성형되는 방전흔적이 누적되는 것으로 가공면에 있는 아주 작은 깊이까지 공작물은 급열, 급냉의 열변화와 고온, 고압에서의 물리화학적 작용을 받아서 모재와는 질적으로 다른 변질층 혹은 이상층이 형성된다.⁽¹⁰⁾ Fig. 9은 I_p 가 10A이고 τ_{on} 이 20 μs 일 때 방전가공면의 단면을 찍은 것으로 방전가공면은 용융물로 덮히고 거기서 발생하는 가스에 의한 구멍과 용융금속이 응고되는 과정에서 생긴 것으로 생각되는 미세한 균열이 보이고 이러한 균열은 고온강도가 높은 재료에서 일어나기 쉬운 현상이라고 생각된다. 가장 바깥표면의 용융 재응고층은 가공단면의 조직에서 백색으로 나타나고 그 하부의 검은 부분은 용융에는 이르지 않았지만 고온의 영향을 받았기 때문에 열영향층이라 하고 그 하부에 금속의 조직이 나타나고 있다.

특히 열변질층의 두께는 거의 일정한 것을 볼 수 있으므로 표면의 요철에는 큰 영향을 받지 않는다고 생각되며 이것은 방전으로 주입되는 열량이 변한다 하더라도 모재의 제거량이 변환할 모재로서는 거의 일정한 열의 영향을

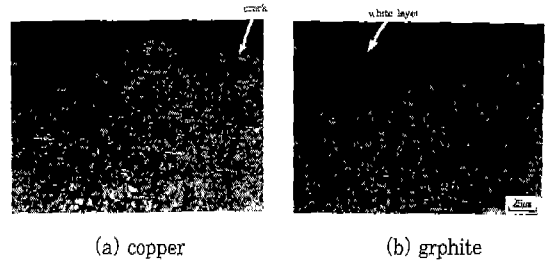


Fig. 9 Photo. of cross-section EDM surface with copper and graphite electrode: $I_p=10A, \tau_{on}=20 \mu s$

받고 있다⁽¹¹⁾는 것을 알 수 있다.

방전가공시의 온도가 고온이기 때문에 이 온도가 재료 내부에 전도되는 열원의 존재시간과 전류밀도가 열변질층의 두께를 좌우하게 되는데 이것은 τ_{on} 이 클수록 재료 내부의 깊은 곳까지 열이 전달되어 열변질층이 두껍게 되고 저전극소모의 가공조건으로 전류밀도가 낮은 경우에는 용융금속의 표면장류가 많게 되어 변질층의 두께가 두껍게 된다고 생각된다. 따라서 열 변질층을 적게 하려면 τ_{on} 이 짧은 가공조건으로 사상가공하는 것이 유리하다고 생각된다.

Fig. 10은 I_p 가 10A이고 τ_{on} 이 20 μs 일 때 방전가공표면에서의 경도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최표면층의 백색에서는 가장 높은 경도치를 나타내고 있는데, 가공된 표면은 유증 방전가공에 의해 기공의 분해로 생기는 탄소가 고온 고압 때문에 침탄⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾되어 탄소를 함유한 상태에서 경도가 높은 표면층을 만든다. 이것은 마르텐사이트와 잔류 오스테나이트 및 용해되지 않은 탄화물로 부터 만들어진다고 생각된다. 그리고 가공

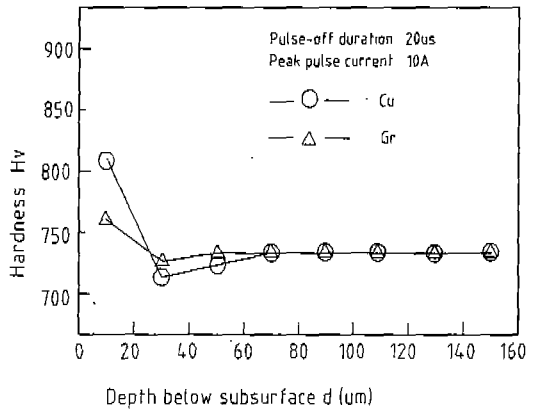


Fig.10 Hardness distribution depending on the depth below surface

표면은 용융 재응고층이 존재하므로 표면에 인장응력이 작용된 잔류응력이 남아 있다. 이러한 잔류 인장응력은 피로강도를 약하게 하기 때문에 가능한 정밀하게 사상 가공하거나, 재열처리 또는 블라스트처리를 하여 인장응력을 압축응력으로 바꾸어 피닝효과(Peening effect)⁽⁸⁾를 얻는 것이 공작물의 수명을 위해 바람직하다고 생각된다. 그리고 열영향층은 용융에는 이르지 않았지만 방전에 의한 열의 영향을 받아 연화되어 모재보다 낮은 경도치를 가진다고 생각된다. 그리고 동전극에 비해 흑연전극을 사용했을 때 열변질층의 두께가 적고 경도도 낮은 값을 가지는데, Fig. 5에서 보는 바와 같이 흑연전극은 조직이 치밀하여 방전점의 이동이 균일하고 넓은 방전흔을 가지므로 동일 에너지에서 동전극에 비해 깊이방향으로의 열전달이 낮기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

CNC 방전가공기로 금형제품에서 널리 이용되고 있는 열처리한 STD11을 사용하여 방전전류펄스폭 및 방전전류과고치를 변화시켜 공작물의 가공량, 전극소모비, 표면조도, 가공단면의 열변질층 및 경도변화를 동전극과 흑연전극을 대상으로 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 방전전류과고치에 따라 최대 가공량을 나타내는 임계 펄스폭($I_p=5A$ 일때 $\tau_m=50 \mu s$)이 존재하며 그이상의 펄스폭에서는 이상방전으로 인하여 가공량이 감소한다.
2. 가공속도를 최대로 발휘하기 위해서는 안정된 방전이 필수적이고 방전유발을 위해서는 조직이 치밀해야 한다.
3. 전극의 소모없이 고속가공을 행할 경우 동전극보다 흑연전극을 사용하는 것이 유리하다.
4. 최표면층인 백층은 가공액의 열분해에 의한 침탄작용으로 가장 경도치가 높고 백층 하부의 열영향층은 연화되어 모재보다 낮은 경도치를 가진다.

참 고 문 헌

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. 緒方 勳, 向山芳世, 崔小新, "液中放電面の特性に關する研究", 精密工學會誌, 第56卷, 第12號, pp.105~110, 1990.
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. 김장호, "방전가공", 기전연구사, 1994.
10. 井上梁, "放電加工의 實際와 應用", 枝多利, 1987.
11. 柳濟九, "放電加工", 大光書林, 1988.
12. T. Masuzawa and C. J. Heuvelman, "Study on the Flushing in EDM", Journal of the JSPE, Vol.51, No.7, pp.1396~1402, 1985.
13. S. T. Jilani, P. C. Pandey, "Experimental Investigations into the Performance of Water as Dielectric in EDM", Proc. 25th Int. Mach. Tool Des. Res. Conf., Vol.24, No.1, pp.31~43, 1984.
14. 六奇賢亮, "鐵鋼材料の放電加工面における變質層", 金屬學會誌, 第26卷, 第6號, pp.283~289, 1963.
15. 齊田義幸, "冷間タイス鋼の放電加工變質層の組織と殘留應力", 電氣加工技術, 第6卷, 第17號, pp.17~25, 1983.