

초경합금의 와이어 방전가공에 의한 특성

맹민재

동서울대학 기계공학부

(2001. 5. 20. 접수 / 2001. 11. 15. 채택)

Characteristics in W-EDM of Tungsten Carbide

Min-Jae Maeng

Division of Mechanics, Dong Seoul College

(Received May 20, 2001 / Accepted November 15, 2001)

Abstract : Wire electrical discharge machining experiments are conducted to investigate characteristics of acoustic emission (AE) and electrical discharge energy due to current peak (I_p), pulse on time(τ_{on}). The AE signals are obtained with a sensor attached to workpiece side. Machining states are identified with scanning electron microscopy and residual stress analyzer. It is demonstrated that the residual stress provide reliable informations about the machining states. Moreover, machining states can be detected successfully using both the residual stress and AE count rate.

Key Words : wire electrical discharge machining, current peak, pulse on time, acoustic emission, residual stress, scanning electron microscopy

1. 서론

초경합금은 탄화물분말을 성형해서 만든 경도가 높은 합금이며 탄화텅스텐을 주체로 한 결합금속인 코발트와 소결합금으로, 코발트는 중량비율이 6~20% 정도이므로 탄화텅스텐 입자들 사이의 코발트에 탄소와 텅스텐의 녹은 것이 개재되어 있다. 이런 조직의 합금은 경도가 높고 내마모성이 우수하므로 정밀 프레스금형에서 생산되는 IC의 리드프레임, 브라운관전자총, 스탬핑금형부품, 콘덴사제작용 기계부품, 지퍼금형, 피스톤링 제작공구, 주석판 절단용 금형, 초경롤 및 디스크컷터 등에 사용되고 있다. 그 밖에 광산이나 토목용에서 바위에 구멍을 뚫는 착암용 공구의 선단 등에도 사용된다. 그러나 이러한 초경합금을 제품화하기 위해서는 기계적 가공방법이 필요하다. 초경합금은 가공이 불가능한 난삭성 재료이므로 전기적에너지를 이용한 새로운 가공법의 하나인 방전가공이 폭넓게 이용되고 있다. 방전가공법은 금속전극과 가공물 사이의 방전현상에 의

해 발생하는 열에너지를 이용하여 절삭가공이 어려운 강, 초경합금, 다이아몬드, 세라믹 등과 같이 매우 경한 재료를 절단하는데 사용된다. 이 분야에 대한 연구자로서는 Tanimura와 Heuvelman¹⁾은 와이어 단선직전에 짧은 스파크의 발생이 일어나는 것과 짧은 회로펄스의 변화가 짧은 시간 동안 지속된다는 것을 발견하였다. Shoda²⁾는 어떤 지점에서 전류의 집중은 높은 온도 때문에 와이어 단선이 된다는 것을 알아냈다. Watanabe³⁾는 통계적인 펄스 분류방법을 제시하여 와이어 단선회수를 많이 줄였다. Wang⁴⁾은 신경망 인공지능 모델을 통하여 절단속도, 표면거칠기, 가공표면의 형태를 예측하였다. 초경합금의 방전가공에 대한 연구는 Kruth⁵⁾ 등은 방전펄스폭을 변화시켰을 때 전극의 마모율, 방전속도 그리고 가공표면에 존재하는 미세크랙 발생에 대해 연구한 결과, 펄스폭이 증가되면 전극의 마모와 방전속도가 증가하는 것을 발견하였다. Lenz⁶⁾ 등은 방전가공시 표면에 형성된 분화구 반경차이 부분의 온도 및 열응력분포에 대하여 연구하였다. Houvelman⁷⁾은 무부하전압, 방전전류 등 전기조건의 변화가 방전가공된 표면에 발생하는 크랙의 방향과 크기 등 균열

특성에 미치는 영향에 대하여 연구하고, 전압과 전류의 변화에 따라 크랙의 크기를 예측하였다. 국내에서는 김창호⁸⁾가 초경합금의 코발트 함량과 방전액의 전기전도율에 따라 가공표면의 거칠기와 이송속도의 변화에 대하여 연구되었다.

방전가공작업에서 방전에너지는 전류최대값, 방전시간, 방전휴지시간 그리고 공급전압 모두의 영향을 받으므로 전기전도율 대신 방전에너지를 방전가공 변수로 사용하였다. 또한 산업현장에서 보다 경제적이고 안전하게 방전에너지를 사용하기 위한 기초자료를 제공하고자 고찰하였다. 따라서 방전에너지를 이용하여 코발트 함유량에 따라 가공폭과 가공표면에 미치는 영향을 조사하고, 가공면 깊이의 변화에 대한 경도, 잔류응력 및 음향방출신호의 특징적 변화를 파악하여 열 영향층을 방지하기 위한 방안을 도출하는 것이다.

2. 방전에너지

방전에너지의 중요한 인자 방전전류최대값 I_p 및 방전시간 τ_{on} 은 방전가공면의 물성치변화에 큰 영향을 준다. 방전가공면은 방전에너지에 의해 열적변화를 가져온다. 가공물 표면으로부터 열적변화는 탄화텅스텐과 코발트가 함께 용융되어 혼합된 용융부, 고온발생과 냉각반복에 의한 담금질층, 결합제인 코발트가 용출되어 균열이 발생한 열영향층, 열을 받지 않은 순수한 모재로 구분되어지며 가공표면의 경도 및 피로강도를 저하시킨다. 그리고 가공 맨위층은 인장응력, 하위층은 압축응력이 발생한다. 방전가공에서는 전류최대값, 극간전압, 방전시간 및 방전휴지시간의 영향을 받으므로 방전에너지를 변수로 사용하였다. 방전에너지 E_d 는 다음의 식으로 계산하였다.

$$E_d = V_m \cdot I_m \quad (1)$$

여기서, V_m 은 평균가공전압, I_m 은 평균가공전류로 나타내며, V_m 과 I_m 은

$$V_m = \frac{V_o \tau_{on} + \tau_{on} V_d}{\tau_{on} + \tau_{off}}, \quad I_m = \frac{(\tau_{off} - \tau_{on}) I_p}{\tau_{on} + \tau_{off}}$$

로 계산된다. 여기서 τ_{on} 은 방전시간, τ_{off} 은 방전휴지시간, I_p 은 방전전류최대값, V_o 은 방전을 일으킬 수 있는 극간전압, $V_o = 2.25 V_d$ 는 공급전압이다.

Table 1은 방전가공조건을 보여준다.

Table 1. Electrical discharge energy for W-EDM conditions

Ed(W)	24	28	30
Pulse			
I_p (A)	4.5	5.8	7.3
V_d (V)	38	35	30
τ_{on} (μ s)	0.5	0.5	0.5
τ_{off} (μ s)	10	10	10

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

Fig. 1은 와이어방전 가공중에 변질층 및 AE신호를 검출하기 위해 와이어방전가공기(AV&G J3025)에 부착한 실험장치의 사진을 보여준다. AE센서는(PAC-R15)는 공작물 측면에 부착하고, 공작물은 테이블 위에 고정하였다. 와이어 이송속도는 60mm/sec, 와이어장력은 800gf로 고정하였고 와이어 전극은 직경 $\phi 0.25$ mm의 황동소재(Cu:65%, Zn:35%)로 4μ m의 아연도금된 와이어(Bedra co.)를 사용하였다. 기타 실험장치는 전치증폭기(PAC-1220A), AE신호처리장치(LOCAN 320-AT), 표면거칠기(Kosaka Laboratory SE-3400), 경도(Kosaka Laboratory Formacoder EF-150S), 잔류응력(Denver & proto co., Canada XRD-1000L)을 측정하였다. 가공표면층은 주사전자현미경(Hitachi-S-2000C)으로 촬영하였다.

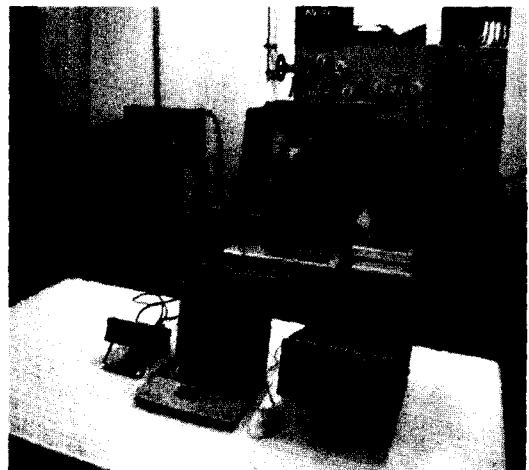


Fig. 1. Photograph of experimental setup

Table 2. Chemical composition and mechanical properties of sintered carbides

Carbide	Chemical composition			Mechanical properties			
	Co (%)	TiC+TaC (%)	WC (%)	Compressive strength (N/mm ²)	Modulus of strength (KN/mm ²)	Thermal expansion (μm/m°C)	Vickers hardness (Applied force, 30Kg)
K20	6	-	94	5,400	630	5.5	1,550
E35	12	3	85	4,500	580	5.9	1,300
D60	20	5	75	3,800	510	6.9	1,100

3.2. 실험방법

실험은 2단계로 수행되었다. 첫 단계에서는 공작물을 와이어방전가공기의 테이블에 설치하고 가능한 변형과 응력을 줄이기 위해 X, Y양방향으로 지지하고 가공을 하였다. 두 번째 단계에서는 가공폭, 표면거칠기, 경도, 잔류응력, 음향방출신호를 각각 절삭조건에 대하여 3회의 실험에서 얻은 평균값을 사용하였다. Table 1은 본 실험에서 사용된 각 공작물의 화학적성분 및 기계적성질을 나타낸다.

3.3. 잔류응력 측정

X선 회절법에 의한 잔류응력 측정법은 $\sin^2\psi$ 법, $0^\circ \sim 45^\circ$ 범이 있다. 본 연구에서는 $\sin^2\psi$ 법을 이용하였다. X선 회절법에 의한 잔류응력 측정은 표준시료를 이용하여 회절선의 최대강도를 찾아서 그 값을 기준으로 강도의 이동된 2θ 값을 반가폭 중점법으로 측정하였다. 면간거리 d_0 의 변화에 대한 $\sin^2\psi$ 선도를 그려서 그 기울기로서 응력을 산출하였다. Fig. 2는 $\sin^2\psi$ 선도이다. 측정조건, 즉 Voltage = 30Kv, Current = 50mA, X-ray target = Cr - $K\alpha_1$ 로 수행하였다. 표면으로부터 깊이 방향으로 측정은 X선이 표면에 침투하는 깊이가 매우 작기 때문에 가공 표면층을 10μm 단위로 전해 연마한 후 측정하였다.

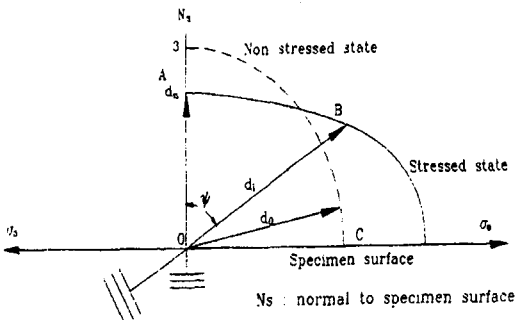


Fig. 2. Vector diagram of plane spacings for a residual stress

3.4. 신호처리

AE센서에서 검출된 신호는 전치증폭기에서 40dB 증폭하고 주파수 영역 100-300kHz에서 여과한 후 AE 신호처리장치에 입력하였다. 입력된 AE신호를 신호처리장치내의 주증폭기에서 20dB 증폭한 후 0.1μs 간격으로 검출하였다. 검출된 AE신호가 100ms 동안에 경계값(threshold value) 100mV를 통과하는 횟수를 검출하여 AE count rate를 산출하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 코발트 함유량

Fig. 3은 방전에너지의 변화와 코발트 함유량의 변화가 가공폭과 표면거칠기에 미치는 영향을 알기 위하여 코발트 함유량이 6, 12, 20%일 때 방전에너지를 24, 28, 30W로 변화시켜 방전가공후 절삭한 가공면의 폭과 거칠기를 측정하여 보여준다. Fig. 3(a)의 경우 가공폭 측정은 공구현미경을 이용하여 측정하였다. 방전에너지와 코발트 함유량이 증가함에 따라 가공폭이 증가함을 알 수 있다. 방전에너지 24W에서 가공폭은 코발트 함유량이 Co-6%일 때 약 326μm이고, Co-20%일 때는 약 344μm로 18μm 정도 차이가 나타난다. Fig. 3(b)는 방전에너지가 증가하고 코발트 함유량이 증가할수록 가공조도는 불량한 것으로 나타난다. 그 이유는 코발트 함유량이 증가할수록 순간적으로 많은 양의 코발트가 표면으로 이탈하고 텅스텐 카바이드의 입자만이 남게 되어 기인하는 것으로 사료된다. 코발트 함유량의 이탈에 따른 텅스텐 카바이드 입자들을 결합시키는 힘이 약화되므로 기계적성질이 감소한다. 이상의 결과를 종합하면 가공폭과 가공조도는 최대전류피크, 방전시간 및 코발트 함유량에 영향을 받는다.

Fig. 4는 방전에너지 24W에서의 가공한 표면상태를 보여준다. 코발트가 6, 12, 20% 함유된 공작물 표면상태를 각각 정밀 분석하고자 주사전자현미경으

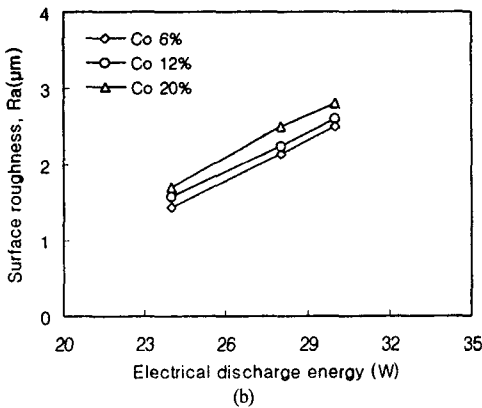
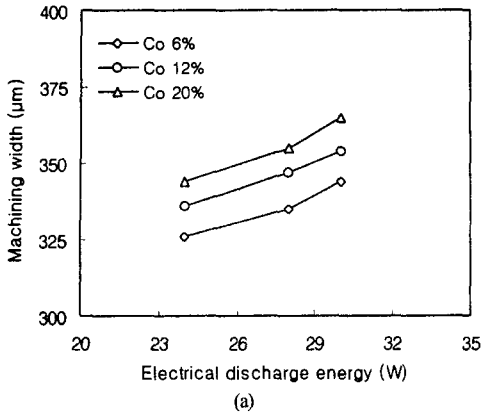


Fig. 3. (a) Machining width and (b) surface roughness versus electrical discharge energy

로 3000배 확대하여 촬영하였다. 코발트 6% 함유된 초경합금은 코발트의 용출이 12, 20% 함유된 초경합금보다 용출량이 적게 발생하였다. 코발트 함유량이 20%인 경우를 살펴보면 방전현상 이외에 누설되는 전류에 의한 전기 분해가 일어나 양극측에 있는 피 가공물의 양극산화에 의한 전해용출에서 기인되었음을 추정할 수 있다. 가공표면은 잔류 오스테나

Surface Energy	Cobalt composition, Co 6%	
	Rough-cut	Polishing
24W		

Fig. 5. SEM micrographs showing machining surface states by rough-cut and polishing at cobalt composition of 6%

이트를 생성시켜 연한 표면층을 만드는 원인이 된 것으로 사료된다.

Fig. 5는 코발트 6% 함유된 공작물을 황삭가공후 폴리싱가공을 수행한 표면이다. 황삭가공한 표면은 가공단면에 수직방향으로 균열이 발생한 것을 확인할 수 있다. 폴리싱가공한 표면은 코발트 분출에 의해 발생한 미세한 균열이 제거된 것을 알 수 있다. 그러나 용융된 코발트는 존재한다. 이상의 결과를 종합하면, 방전가공한 표면은 용해된 성분이 표면에 잔류하기 때문에 표면강도를 감소시키고 균열의 성장이 될 수 있으므로 폴리싱, 래핑 등으로 제거되어야 한다고 결론지을 수 있다.

4.2. 경도변화

초경합금은 고경도의 탄화물상을 금속으로 접합시킨 복합조직으로서 일종의 분산 강화형 합금으로 합금의 경도는 탄화물의 입도 및 부피에 따라 변화하게 되는데 상온은 물론 고온 영역에서도 고경도를 가지며 이는 초경합금의 가장 큰 특성이다. 초경합금의 경도측정은 비커스 또는 로크웰경도 측정을 주로 사용한다. 본 실험에서는 비커스경도 측정을 이용하였다. Fig. 6은 방전에너지와 코발트 함유량의 변화에 따른 가공면 깊이의 변화가 경도에 미치는

Surface Energy	Cobalt composition(%)		
	Co-6	Co-12	Co-20
24W			

Fig. 4. SEM micrographs showing machining surface states at cobalt composition of 6, 12, and 20

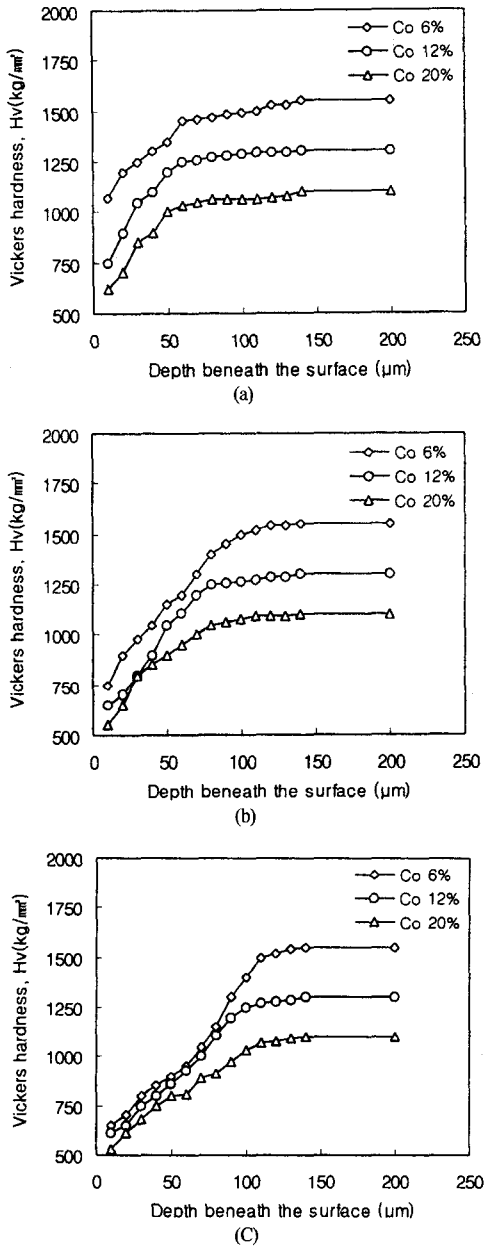


Fig. 6. Variation of Vickers hardness versus depth beneath the surface in machining with electrical discharge energy of : (a)24W, (b)28W, (c)30W

영향을 나타내고 있다. Fig. 6(a)의 경우를 살펴보면 가공 표면에서부터 가공면 깊이가 약 60 μm 까지는 경도가 감소하여 급격히 회복되는 단계로 확인할 수 있다. 약 60~150 μm 단계에서는 미미한 차이로 회복되다가 약 150 μm 부터는 가공전의 경도값으로 회복

되었다. 다른 가공조건, 28, 30W에서도 경도가 감소하여 회복되는 단계가 정성적으로 유사한 결과를 얻었다. 미소한 차이는 방전에너지가 증가하면 표면층으로부터 경도변화가 깊게 침투하는 것을 확인할 수 있다.

4.3. 잔류응력

Fig. 7은 방전에너지의 변화에 따른 가공면 깊이의 변화가 잔류응력에 미치는 영향을 보여준다. 잔류응력을 측정할 이유는 방전전류가 흐르면 순간적으로 발생한 3,000~10,000 $^{\circ}\text{C}$ 정도의 높은 열로 금속의 일부는 용융된다. 고열에 의해 금속 주변의 가공액은 급격한 기화 팽창하여 폭발하면 용해된 금속은 미세한 구슬모양으로 비산한다. 방전액은 급격한 기화 팽창하여 폭발하면 용해된 금속은 미세한 구슬모양으로 비산하여 방전액 안으로 확산되고 주변의 방전에 의해 고온의 금속표면은 급냉되면서 소둔된다. 그리고 초당 수회씩 이상 연속적 방전작업에 의해 한 부위에 방전이 겹치게 되면서 표면은 급열, 급냉을 반복하게 되면서 응력을 받기 때문이다. 방전가공시 가공면 깊이의 변화에 따라 잔류응력의 영향을 받으므로 잔류응력을 변수로 사용하였다. 잔류응력의 측정이론은 다음의 식으로 표현할 수 있다.⁹⁾

$$\Delta d/d_0 = (1 + \nu) \sigma_{\psi} \sin^2 \psi / E \quad (2)$$

여기서, $\Delta d = d_i - d_0$ 로서 d_i 는 시료표면에 ψ 각도 만큼 기울어진 결정면의 면간거리, d_0 는 응력을 받는 상태에서 격자간격, E는 탄성체의 영계수, ν 는 프아송비, ψ 는 X-ray의 기울기각, σ_{ψ} 은 잔류응력이다. 이때 $\Delta d/d_0$ 에 대한 $\sin^2 \psi$ 선도를 그리면 그 기울기 값이 공작물의 표면에 존재하는 잔류응력 σ_{ψ} 가 된다. 공작물의 표면층에서는 인장잔류응력이 나타났고 표면으로부터 깊이가 어느 정도 깊어지면 압축 잔류응력으로 변화하였다. 가공 표면층의 깊이가 더욱 증가하면 압축잔류응력은 급격히 증가하여 최대값으로 되고 이후부터는 압축잔류응력이 점차로 감소하여 약 200 μm 깊이 이상의 가공층부터는 무시할 정도로 미소하게 나타났다. Fig. 7(a)는 방전에너지가 24W의 경우로서 가공면 깊이가 약 50 μm 까지는 인장응력이 작용하고 그 이후부터는 압축응력이 작용하기 시작하여 약 90 μm 에서 압축응력이 최대가

되는 경향을 알 수 있다. (b), (C)는 각각 방전에너지가 28, 30W의 경우로서 방전에너지가 증가함으로써 인장응력이 종료되는 단계와 압축응력이 최대가 되는 단계의 증가 경향을 확인할 수 있다. 이것은 열응력 때문에 조직의 변화가 발생한 것으로 사료된

다. 이상의 결과를 종합하면, 방전에너지가 증가하면 가공시간은 단축되나 표면거칠기가 나빠지며, 경도는 감소하고 잔류응력은 가공층으로부터 깊게 침투되어 폴리싱 시간이 증가한다.

4.4. AE신호

방전가공에서 공작물이 가공되는 과정을 살펴보면 용해 → 증발 → 폭발 → 비산 단계에 의하여 가공물을 방전 기화시키면서 가공을 한다. 여기서 폭발이라는 것은 화학방전 때문에 생기는 방전주에서 고온도의 열이 발생한다. 이 열에 의하여 가공액은 급격히 증발하여 미처 확산되지 못하고 대단히 큰 압력을 형성하여 결국은 방전주 내부에 존재하는 고압의 증발 공기는 폭발한다. 이 폭발압력을 가공압력이라 하는데 가공압력에 의하여 전극와이어는 진동이 발생한다. 진동은 공작물에 전달되어 음향방출의 발생원이 된다. Fig. 8은 가공폭과 가공면 거칠

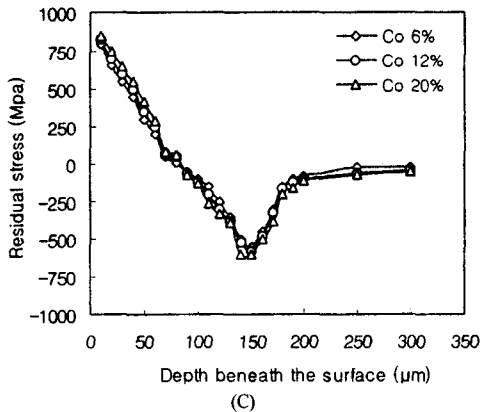
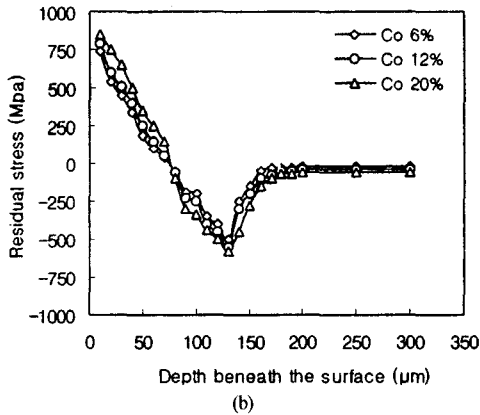
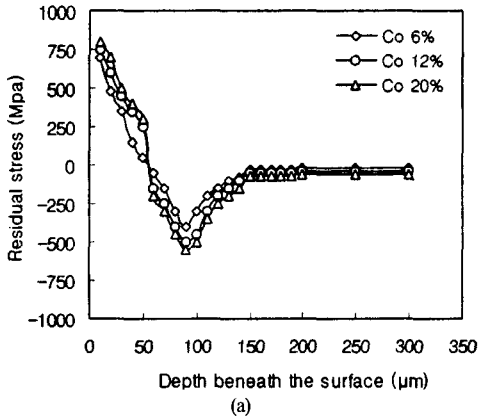


Fig. 7. Variation of residual stress versus depth beneath the surface in : (a)24W, (b)28W, (c)30W

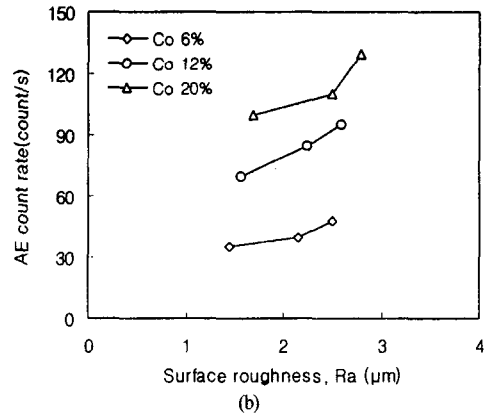
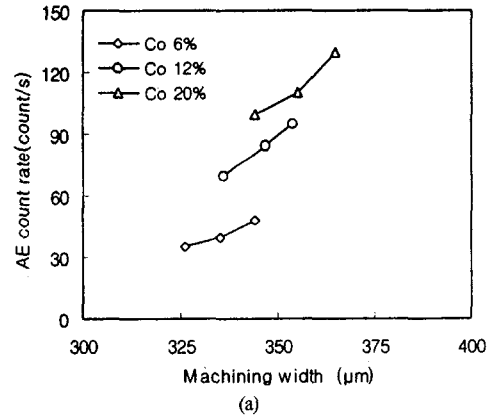


Fig. 8. AE count rate versus (a) machining width and (b) surface roughness

기의 증가에 따라 AE count rate의 변화를 도기한 것이다. 가공폭과 표면거칠기가 증가할 수록 음향방출 신호가 증가하며 코발트 함유량의 증가에 따라 음향방출신호는 뚜렷하게 변화하는 경향을 알 수 있다. 그 이유는 방전주에 분출하는 코발트의 양이 증가하여 공작물에 진동을 발생시켰기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

와이어방전 가공시 코발트 함유량에 따른 가공폭, 표면층상태, 경도, 잔류응력, 음향방출신호를 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 열적변화는 탄화텅스텐과 코발트가 함께 용융되어 혼합된 용융부, 고온발생과 냉각반복에 의한 담금질층, 결합제인 코발트가 용출되어 균열이 발생한 열영향층, 열을 받지 않은 순수한 모재로 구분한다.

2) 가공폭 및 조도는 코발트 함유량이 증가할수록 증가한다.

3) 열응력 때문에 조직의 변화가 발생하여 표면층에는 경도가 감소하고 잔류응력은 인장응력이 발생하며, 하위층은 경도는 회복되고 잔류응력은 압축응력이 작용한다.

4) 가공폭과 표면거칠기가 증가할수록 음향방출 신호가 증가하며 코발트 함유량의 증가에 따라 음향방출신호는 뚜렷하게 변화한다.

5) 음향방출신호의 발생원은 방전주에 분출하는 코발트에 의하여 주로 생성된다.

6) 방전가공한 표면은 용해된 성분이 표면에 잔류하기 때문에 표면강도를 감소시키고 균열의 성장이 될 수 있으므로 폴리싱, 래핑 등으로 제거되어야 한다.

참고문헌

- 1) T. Tanimura, and C. J. Heuvelman, "Properties of the Servo Gap Sensor with Wire Spark Erosion Machining," Annals of the CIRP, Vol. 26, pp. 59~63, 1977.
- 2) K. Shoda, and Y. Kaneko, "Adaptive Control of W-EDM with On-Line Detection of Spark Location," Proc. 10th North American Manufacturing Research Conference, SME, pp. 410~416, 1992.
- 3) H. Watanabe, and T. Sato, "About the Evolution of Wire Tool Performance in W-EDM," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 175~178, 1990.
- 4) Z. Q. Wang, and T.A. Spedding, "Study on Modeling of W-EDM Process," Journal of Materials Processing Technology 69, 1995.
- 5) H. Cornelissen, R. Snoeys, and J. P. Kruth "Investigation on the Optimal Machining Conditions for Electro-Discharge Machining of Cemented Carbides," 5th North American Metalworking Research Conference (NAMRC-V), pp. 258~263, May. 1977.
- 6) E. Lenz, E. Katz, W. Konig, and R. Wertheim "Cracking Behaviour of Sintered Carbides EDM," Annals of the CIRP, Vol. 24, pp. 109~114, 1975.
- 7) C. J. Heuvelman, "Summary Report on the CIRP Research on Spark-Erosion Machining of Cemented Carbides(Die-Sinking)," Annals of the CIRP, Vol. 29, No. 2, pp. 541~544, 1980.
- 8) C. H. Kim, "Machinability and Surface Characteristics of Sintered Carbides on W-EDM," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 100~105, 1999.
- 9) 한봉희, "X선 잔류응력 측정," 대한금속재료학회지(기술해설), Vol. 17, No. 2, pp. 153~158, 1979.