

방전액의 전도율이 와이어방전가공성에 미치는 영향

김 창 호*

(2001년 6월 5일 접수, 2001년 11월 28일 심사완료)

Influence of Electrical Conductivity of Dielectric on Machinability of W-EDM

Chang-Ho Kim

Key Words: Wire Electrode(와이어전극), Electrical Conductivity(전기전도율), Dielectric(방전액), Metal Removal Rate(방전가공속도), Sintered Carbide(초경합금)

Abstract

In wire-electrical discharge machining (W-EDM), the dielectric plays an important role as the working fluid. It affects the material removal rate and the properties of the machined surface. This paper deals with the effects of the electrical conductivity of dielectric and cobalt percentage of sintered carbides on the machining characteristics and the machined surface integrities with deionized water as dielectric. A series of experiments have been performed on sintered carbides having different cobalt contents. Experimental results show that a higher cobalt content of WC decreases the metal removal rate and worsens the surface quality. Lower electrical conductivity of the dielectric results in a higher metal removal rate as the gap between wire electrode and workpiece reduced. Especially, the surface integrities of rough-cut workpiece, wire electrode, and debris were analyzed also through scanning electron microscopy(SEM) and surface roughness tester. By energy dispersive spectrometry(EDS), it is confirmed that micro cracks and some of electrode material are found on the workpiece surface.

1. 서론

와이어방전가공(Wire Electrical Discharge Machining : W-EDM)은 Fig. 1과 같이 방전액(dielectric)속의 음극(주로 와이어전극)과 양극(공작물)사이에서 발생하는 플라즈마 방전현상에 의해 약 8,000~12,000℃초고온의 열이 발생하는데 이 열이 집중되어 금속의 표면의 일부가 용융 및 기화하여 공작물을 비접촉 절삭하는 메커니즘이다. 전극인 와이어($\phi 0.03 \sim 0.3\text{mm}$)에 장력을 준 상태에서 와이어를 공급하면 공작물과 전극사이에서 발생하는 방전에너지로 2차원의 윤곽형상을 가공하는 것이다. 와이어방전가공은 정삭가공 여유량을 감안하여 황삭가공을 한 후 동일한 궤적으로 전극과 공작물간의 간격인 오프셋(offset)을 줄여가면서

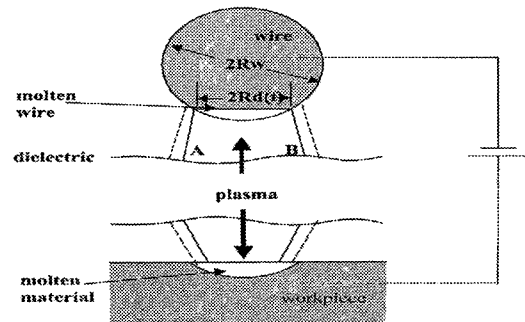


Fig. 1 Physical model of WEDM

가공제품의 요구정도에 따라 2~6회의 정삭가공을 통하여 최종치수까지 가공하는 방식이다.⁽¹⁾

일반적으로 WEDM의 가공성 즉 절삭성과 전극의 마모는 방전가공기의 전원형태, 작업상의 전기조건, 와이어소재 와이어 전극재의 화학적 조성, 물리적 성질들에 의해 좌우되며 표면정도 및 공차 제어는 전극의 품질과 상당한 관련이 있

* 회원, 동의대학교 기계산업시스템공학부
E-mail : chkim21@dongeui.ac.kr
TEL : (051)890-1651 FAX : (051)890-2232

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of sintered carbides

Items Carbide	Chemical composition			Mechanical properties			
	Cobalt (%)	TiC+TaC (%)	WC (%)	Compressive strength(N/mm ²)	Modulus of strength (kN/mm ²)	Thermal expansion (μm/m°C)	Hardness (Hv 30)
GT 10	6	-	94	5,400	630	5.5	1,550
GT 20	12	3	85	4,500	580	5.9	1,300
GT 30	15	3	82	4,100	540	6.5	1,200

다. 왜냐하면 전류가 잘 흐를 수 있는 전기전도율과 단선을 피할 수 있는 충분한 인장강도를 갖고 있어야 하기 때문이다.⁽²⁾

현재 널리 쓰이는 와이어는 순동에 30% 이상의 아연을 첨가시켜 만든 황동선으로서 순동선의 인장강도를 보강하기 위하여 개발된 비교적 우수한 전도율을 갖고 있다. 또한 동의 3배 이상되는 기계적성질 및 인장강도를 갖고있기 때문에 동선에 비해 와이어 단선의 위험이 적을 뿐 아니라 방전가공시 만족할 만한 표면조도를 얻을 수 있다.

초경합금은 분말형태의 텅스텐 카바이드(tungsten carbide: WC 혹은 탄화 텅스텐)와 소량의 결합제(Co, Ti, Ta, V, Mo 등의 분말)를 소결시켜 제조하며 경도와 내마모성 등 기계적성질이 다른 금속에 비해 뛰어나므로 내마모와 내열성재료인 절삭공구용 소재와 내충격 및 높은 강성이 요구되는 프레스 금형 등에 주로 사용되고 있다.

본 연구는 Co의 함유량이 다른 3종류의 초경합금을 WEDM 가공하였을 때 Co의 함유량과 탈이온화수의 전기전도율의 변화가 가공속도 및 표면 거칠기 등에 미치는 영향을 실험에 의해 규명하고 정밀가공을 위한 최적의 방전조건을 얻고자 하였다. 또한 가공표면 및 와이어전극의 표면 등을 SEM 과 Kevex EDS로 분석하여 방전가공에 의한 금속조직상의 변화와 그 영향 등을 조사하였다.

2. 방전액

방전액(Dielectric)의 시스템은 Fig. 2와 같이

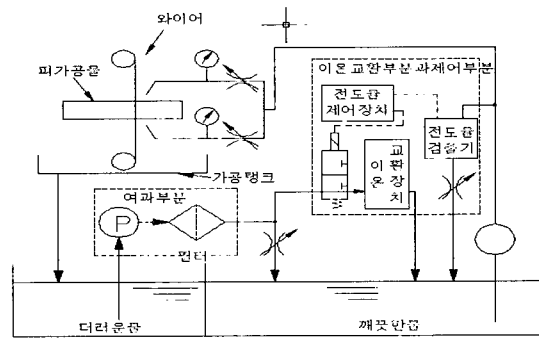


Fig. 2 Dielectric system in WEDM

방전액을 카트리지 필터(cartridge filter)로 여과하는 여과부와 방전액을 전도율 센서로 검출한 뒤 입력된 전도율로 제어하는 이온교환 및 제어부분으로 나뉘어져 있다. 가공 후의 가공액은 더러운 물통에 회수된 뒤 펌프 P에 의해 여과필터에 가압송급되어 금속가공분이 제거된다. 여과된 방전액은 이온을 포함하고 있기 때문에 이온교환장치(ion exchanger)를 흘려가서 탈이온화 된 맑은 방전액이 방전가공 중인 가공탱크로 공급된다. 이때 가공액은 전기전도율 검출전극을 통하여 검출된 저항치가 작업자가 전도율제어장치에 설정한 값보다 상승하면 이 장치에서 전자밸브에 작동신호를 보냄으로 여과액의 일부를 맑은 물탱크로 보냄으로서 전기전도율을 낮추는 것이 방전액의 제어의 원리이다.⁽³⁾

방전액은 일반적으로 공작물과 전극간의 절연(insulation)과 이온화(ionization), 공작물의 냉각 및 금속분의 제거 등의 역할을 한다. 방전액으로는 탈이온수(deionized water)를 사용하나 일부 일본 방전기의 경우 2개의 분리된 탱크 내에 방전가공유와 탈이온수를 따로 넣고 공작물의 재질 및 표

면정도에 따라 둘 중 하나의 방전액을 선택하여 사용할 수 있도록 제작된 기계도 있다.⁽⁴⁾

방전액의 전기전도율은 물의 절연성을 표시하는 척도로서 방전액내의 미약한 전류치를 측정하여 전도율($\mu S/cm$) 혹은 비저항치(Ωcm)로 표시하는데 그 값은 가공속도, 가공거칠기 등에 영향을 준다.

3. 실험방법 및 장치

실험용 시편은 Table 1과 같이 Co의 함유량이 각각 6, 12, 15%에 탈륨카바이드(TaC) 및 티타늄 카바이드(TiC)가 일부 포함된 3종류의 초경합금(Widia Co. 독일)을 사용하였으며 가공하는 폭과 두께가 각각 5, 10mm이다.

와이어방전가공기는 Robofil 2000기종(스위스 Charmilles사)이며 와이어 이송속도는 60 mm/sec, 와이어 장력은 900gf로 고정하였다. 와이어 전극은 직경 0.25mm의 황동소재(Cu:70, Zn:30%)에 4~5 μm 아연 도금된 와이어(Cobracut A:독일)를 사용하였다.

WEDM의 횡수에 대한 표면조도의 변화를 파악하기 위하여 작업매뉴얼의 황삭, 정삭조건을 선택하여 먼저 황삭가공한 시편을 다수 준비한 다음 정삭가공을 1차씩 추가하여 4차까지 차수별로

가공하였다.⁽⁵⁾ 추가되는 정삭가공의 차수는 차수가 증가할수록 전기조건이 점차 약한 조건이다. 방전액의 전기전도율은 5, 10, 15, 20 $\mu S/cm$ 의 4종류로 셋팅하여 실험하였다. 전기전도율 값은 제어부의 사용자 선택 모드(User Parameters)중 EXE 모드에서 제어되며 실제 작업탱크내에서 방전액을 측정된 값은 INFO 모드에서 디스플레이 된다.

실험을 위한 공작물 및 전극, 작업회수 등 제반 가공조건은 Table 2와 같다.

4. 실험결과 및 고찰

WEDM한 시편들을 에폭시(epoxy) 안에서 물딩한 뒤 여러 단계의 다이아몬드 휠로 연마하고 다이아몬드 페이스트(diamond paste)로 폴리싱하였다. 폴리싱한 시편의 표면을 Murakami 액으로 에칭한 뒤 주사식 전자현미경(JSM-6300, JEOL사)로 방전가공된 금속표면의 조직을, 표면거칠기 측정기(Tallysurf-120L)를 통하여 간격 1.25 μm , 컷 오프 값이 0.8mm인 중심선 평균 거칠기(Ra)로 나타내었다.

초경합금의 WEDM 작업원리는 Fig. 3과 같이 와이어가 입출력하는 궤적을 따라서 공작물과 와이어전극간에 집중적인 전기장이 형성된다. 이 전기장에서 발생한 방전에너지가 방전액 속에서 전해작용을 일으켜서 WC의 Ti, Ta, Co, V, Mo 등 여러 결합제중 이온화경향이 높은 Co가 Co^{2+} ion으로 수중에 용출되므로 결합제인 Co를 잃은 초경합금 표면은 미세한 크랙, 재용융층, 기계적인 크랙 등의 손상이 발생하게 된다.⁽⁶⁾

Table 2 Machining conditions

items		
work-piece	kinds	WC (Co 6, 12, 15 %)
	height	10, 20, 30, 50(mm)
electrical conductivity		5, 10, 15, 20($\mu S/cm$)
wire	core material	CuZn30 brass
	coating	4 μm Zn
	feed rate	60 mm/sec
	tension	900 gf
machining mode		A) rough cutting B) As A + fine shaping C) As A + surface semi-finishing D) As A + surface finishing E) As A+ surface micro-finishing

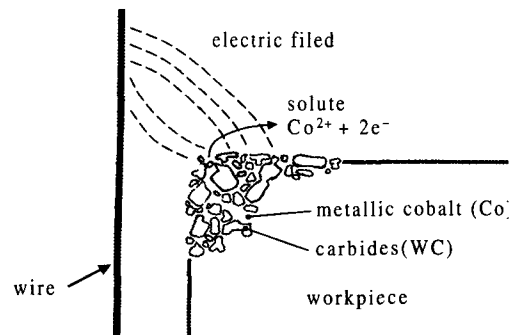


Fig. 3 Electrochemical reaction between wire and sintered carbides

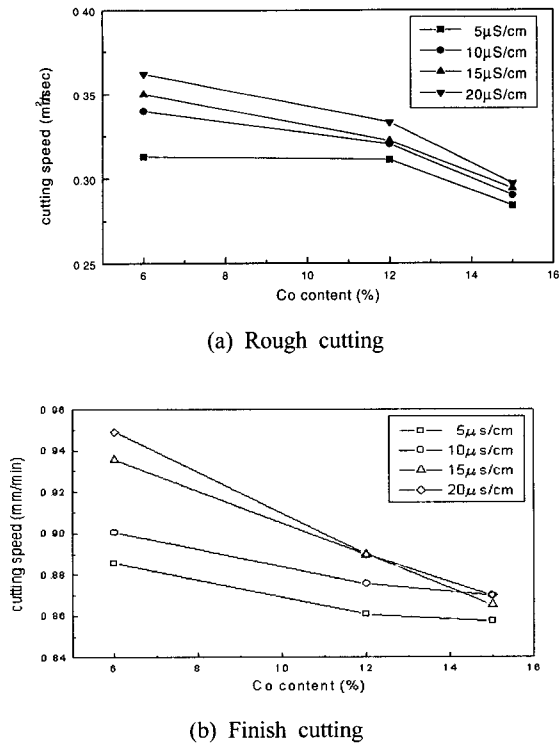


Fig. 4 Relationship between electrical conductivity and cutting speed

4.1 방전가공속도

방전가공속도는 펄스 ON/ OFF시간, 최대전류치 및 무부하전압(no-load voltage), 서어보 전압의 크기 및 방전갭 등의 전기조건에 의해 좌우될 뿐 아니라 공작물의 용융점과 열/전기전도율, 와이어 전극의 재질과 방전액의 전기전도율 등에 의해 좌우된다. 특히 WEDM의 초경합금 가공성을 결정하는 요소들은 와이어 방전가공기의 정밀도, WC의 재질 및 카바이드 부품의 설계, 가공케절 및 방전횟수, 방전액의 유지방법 등이다.⁽⁷⁾ 전류의 ON 시간과 평균전류 등의 크기를 변화시키면서 Co함량이 다른 초경합금을 방전가공(EDM)실험한 결과 방전가공속도는 Co함량과 비례한다.⁽⁸⁾

전기전도율 값이 다른 방전액 속에서 공작물을 황삭 및 4차의 정삭가공하였을 때의 방전가공속도(mm/min)를 스톱워치로 측정된 결과가 각각 Fig. 4(a) 및 (b)이다. 황삭 및 정삭가공 모두 Co함유량이 증가할수록 방전가공속도가 감소하였는데 이것은 합금의 함유량이 적은 합금원소에 비해 합금원소량이 많을수록 일정한 전류의 제어가 힘

들기 때문이라고 생각된다.

그리고 방전액의 전기전도율이 높아질수록 방전가공속도가 증가하였다. 방전액의 전기전도율의 변화는 방전메커니즘 자체를 근본적으로 변경시키며, 플라즈마 영역의 형성에 큰 영향을 미친다. 그림에서 방전가공액의 전기전도율이 높을수록 방전갭이 넓어지고 방전의 발생빈도수를 증가시켜 가공하기가 안정되기 때문에 방전속도가 빨라진 것이다.⁽⁹⁾

B. M. Schumacher 등은 방전분에 의해 전극과 공작물간의 방전갭이 오염되면 방전이 발생하는 위치와 갭의 폭 뿐만 아니라 방전전화에 영향을 미친다고 발표하였다. 방전전화는 방전액 내의 방전분에 의해 시작되기도 하는데 오염정도가 심할수록 극간이 짧아져서 더 빨리 점화를 일으키며 휴지시간이 짧아지게 되므로 방전주기가 빨라지므로 방전가공속도가 증가하는 것이다.⁽¹⁰⁾ 방전작업 중에는 계속 용융되어져 나오는 급속가공분에 의해 방전액의 전기전도율이 증가하기 때문에 계속적으로 감지 및 제어하는 장치에 의해 정해진 수준 이하로 유지될 수 있도록 하는 것이 방전성능에 필수적이다.

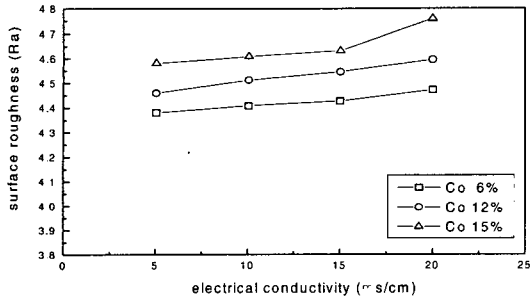
4.2 방전가공면의 표면거칠기 및 특성

Fig. 5의 (a) 및 (b)는 동일한 조건하에서 황삭 및 정삭가공한 뒤의 가공단면에 대한 표면거칠기의 측정결과이다.

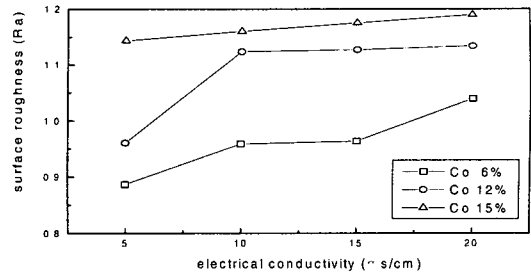
그림에서 방전가공액의 전기전도율이 높을수록 표면거칠기가 거칠게 나타났다. 이것은 전도율이 높을수록 방전전류는 감소하고 누수전류의 증가에 의해 표면이 전기분해작용 혹은 양극산화가 현저히 진행되어 표면의 전식이 증가하여 생긴 현상이다. 또 극간의 상하부와 중간부의 전기전도율의 차가 상대적으로 적어지고 복형상이 감소해지는 경향이 있다

그러나 전기전도율이 너무 낮으면 방전간격이 좁아지게 되고 방전효율이 떨어지기 때문에 이 전기전도율의 제어는 가공성능상 중요한 역할을 하고 있다.

황삭가공의 경우, 많은 양의 급속가공분이 생기면 가공도중에 아크를 발생시키기도 하는데 이 아크는 방전스파크가 방전액을 통과하여 공작물 쪽으로 진행할 때 물 속의 급속가공분과 충돌하



(a) Rough cutting



(b) Finish cutting

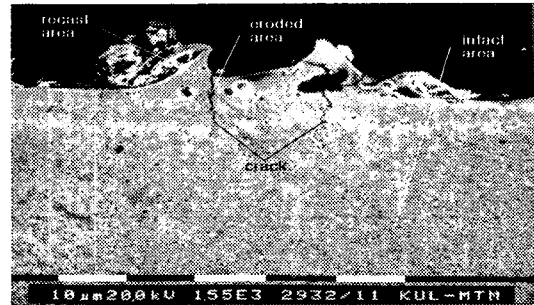
Fig. 5 Co content and surface roughness

여 2차 방전이 발생하는 것으로서 공작물의 표면에 깊은 자국을 만들어 표면불량을 생기게 한다. 또 방전주(discharge channel)가 넓을수록 극간에 방전에너지가 고르게 분포되어 금속을 용해하며 방전궤이 클수록 이상적인 스파크 에너지로 가공물의 표면에 넓고 얇게 가공되므로 보다 나은 표면조도를 얻을 수 있다.⁽¹¹⁾

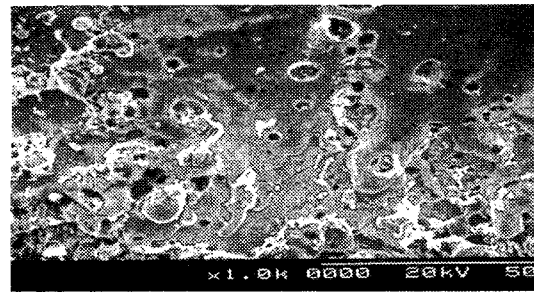
또 초경합금내의 Co함량이 높을수록 표면거칠기가 거칠게 나타난 것은 단위면적 당 Co함량이 낮은 소재에 비해 더 많은 Co가 용융되어 표면으로부터 이탈되므로 거칠게 된다. 그리고 Co의 이탈에 따라 WC의 결합력이 약화되므로 압축강도 등 기계적성질이 떨어진다.

Fig. 6은 Co 12%의 초경합금을 상단면의 좌측에서 우측으로 황삭 방전가공하였을 때의 SEM사진으로서 다음과 같이 3단계의 층으로 구분할 수 있다.

Fig. 6(a)는 Co 12%의 소재를 상단면의 좌측에서 우측으로 황삭 방전가공하였을 때 횡단면을, Fig. 6(b)는 종단면을 각각 보여주는 SEM사진으로서 그림의 상면으로부터 가공단면을 3단계의



(a) Lateral section



(b) Cross section

Fig. 6 SEM photographs of WEDMed surface

층으로 구분할 수 있다.

Fig. 6(b)의 종단면과 같이 Fig. 6(a)의 맨 위층은 방전의 영향을 가장 많이 받는 부분으로서 방전열에 의해 용융된 텅스텐 카바이드와 코발트가 표면에 재응고된 영역(recast area)이며 방전스파크에 의해 발생한 분화구(crater)도 볼 수 있으며 표면으로부터 약 4~8 μ m의 깊이에 걸쳐 있다.

재응고 영역 아래 부분은 작은 반점 형태의 부식이 생기거나 Co를 빼앗겨 크랙이 발생한 영역(ero-de area: cobalt depleted area, 깊이 6~15 μ m)으로서 맨 위층과 더불어 매우 취약한 지역이다.

재응고 영역 아래 부분은 작은 반점 형태의 부식이 생기거나 Co를 빼앗겨 크랙이 발생한 영역(ero-de area: cobalt depleted area, 깊이 6~15 μ m)으로서 맨 위층과 더불어 매우 취약한 지역이다. 이것은 초경합금의 소결과정에 의해 높은 표면장력으로 카바이드 입자들을 단단한 골격구조로 끌어당기고 있는 코발트가, 방전스파크로 인하여 입자들간의 장력이 해제되어 텅스텐 카바이드 입자가 공작물로부터 자유로이 이탈하여 크랙이 생기게 되는 것이다.

황삭방전조건으로 가공한 표면의 변질층은 취성이 크고 크랙이 있으므로 소재가 응력을 받으면 크랙이 점차 발전하여 파손을 일으킬 위험이 크며 초경합금과 같이 고온강도가 높은 재료에서 일어나기 쉬운 현상으로 추측된다. 이러한 현상은 크롬, 텅스텐, 몰리브덴, 바나듐 등의 합금원소를 많이 함유한 냉간금형강, 열간금형강, 고속도강, 내열강 등에서 생기며 저합금강에서는 생기지 않는다.

위의 두 부분은 급열급냉에 의해 담금질상태의 특성을 지니게 되어 심한 조직의 변화와 더불어, 잔류응력이 표면층으로부터 상당한 깊이로 걸쳐 존재하며 그 크기도 클 것으로 예상되어 공작물의 피로수명에 막대한 영향을 미칠 것으로 보인다.⁽¹²⁾

위의 두영역 아래부분이 크랙이 없는 순수한 모재(intact area)이다.

Co 6 %의 초경합금을 황삭 방전조건으로 가공한 한 뒤 공작물표면의 구성요소를 파악하기 위하여 횡단면 중의 여러 곳을 KeveX EDS(Energy Dispersive Spectrometer)로 분석한 결과 Fig. 7과 같이 Co 1.60%, Cu 4.55%, Zn 2.93% W 86.33%로 나타났다. 이 중에 Cu, Zn 성분이 검출된 것은 용융된 황동 와이어 전극의 일부가 가공된 표면에 부착된다는 것을 알 수 있다.⁽¹³⁾

표면에 존재하는 용융된 와이어 전극소재와 크랙, 재용융층을 래핑, 연마제 유동성형 등의 폴리싱을 이용하거나 방전가공 옵션량을 달리한 4~5회의 정삭가공으로 제거함으로써 표면의 경도 및 강도를 향상시킬 수 있다.

Fig. 8은 코발트6%인 초경합금을 방전가공할

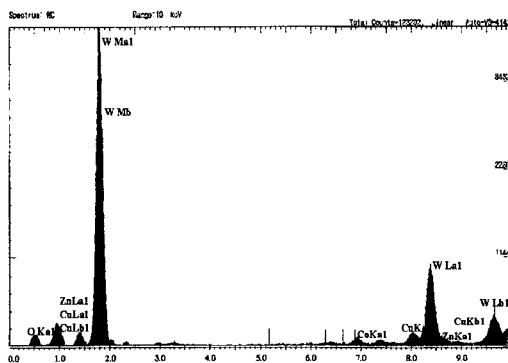


Fig. 7 Energy dispersive spectrometry of WEDMed surface

때의 가공분에 대한 SEM 사진으로서 EDS 분석 결과, 초경합금의 주성분인 Co, WC와 Co의 용융 혼합물과 와이어 전극 소재인 Cu, Zn 등이 검출되었다. 금속가공분은 2~10 μ m의 다양한 크기의 분포를 이루고 있으므로 가공분 제거용 카트리지 필터의 입도를 적절하게 선정하는 것이 효과적인 금속가공분의 여과와 방전액의 전기전도율의 제어 가능케 하여 작업능률을 향상시킬 수 있다.

Fig. 9(a)는 실험에 사용된 와이어 전극의 일부를 확대한 사진으로서 상부표면이 하부와 달리 표면이 벗겨지고 손상된 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 1의 상면에서 와이어 전극중 공작물과 마주 대하고 있는 부분으로서 전극에 전기장이 형성되면 방전스파크에 의해 전극도 공작물과 마찬가지로 용융된 것이다. WEDM에 한번 사용한 와이어는 열적으로 손상을 입었을 뿐 아니라 기계적 강도도 떨어지므로 재 사용할 수 없다.

Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)를 확대한 것으로서 전극의 도금층 및 모재가 방전스파크에 의한 급열과 방전액에 의한 급냉에 의해 담금질된 상태로서 열변형으로 인하여 취성이 강하며 크랙이 존재함을 볼 수 있다.

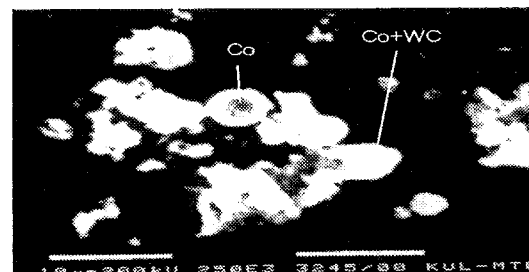
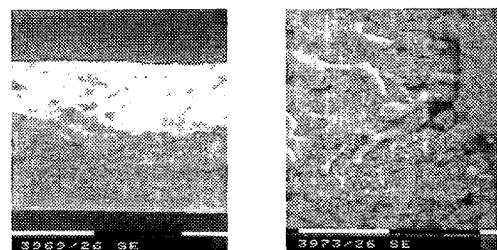


Fig. 8 SEM photograph for debris in W-EDM (WC 88%, Co 12%)



(a) Magnification 230 (b) Magnification 2500

Fig. 9 Used Wire Electrode

5. 결 론

(1) 전도율이 낮을수록 표면거칠기는 향상되었으나 방전가공속도는 감소하였다. 따라서 표면의 높은 정밀도를 요구하는 공작물은 탈이온화장치 및 카트리지 필터를 최적으로 제어하여 정해진 전도율 이하로 유지하는 것이 바람직하다.

(2) Co의 함량이 높을수록 순간적으로 용융된 금속가공분이 방전가공된 표면에 많이 부착되어 거칠게 된다.

(3) 방전가공된 표면에는 와이어 전극소재와 크랙이 발견되었으며 텅스텐 카바이드와 코발트의 재응고층이 존재하였다. 이 변질층은 방전가공 옵션량을 달리한 4회의 정삭가공으로 거의 제거할 수 있었다.

(4) WEDM에 한번 사용한 와이어는 열적으로 손상을 입었을 뿐 아니라 기계적 강도도 떨어지므로 재 사용할 수 없다.

후 기

이 논문은 2000년도 동의대학교 두뇌한국21사업(Brain Korea 21)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) 강상훈, 박원조, 배성한, 1993, "CAD/CAM 와이어 방전가공의 가공확대 여유에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 17, No. 2, pp. 380~384.
- (2) Dauw, D. F. and Albert, L., 1992, "About the Evolution of Wire Tool Performance in Wire EDM," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 1, pp. 221~225.
- (3) Kunieda, M. and Yanatori, K., 1996, "Study on Debris Movement in EDM Gap," *Int'l J. of Electrical Machining(IJEM)*, No. 2, pp. 43~49.
- (4) Luo, Y. F., 1997, "The Dependence of Interface Discharge Transitivity upon the Gap Debris in Precision Electrodischarge Machining," *J. of Material Processing Technology*, Vol. 68, pp. 121~131.
- (5) Charmilles Technologies Co., 1993, *Operating Manual*.
- (6) 김창호, Kruth J. P., 1999, "초경합금의 와이어 방전가공 가공성 및 표면특성," 한국정밀공학회지, 제16권 제8호, pp. 100~105.
- (7) Cornelissen, H., Snoeys, R. and Kruth, J. P., 1977, "Investigation on the Optimal Machining Conditions for Electro-Discharge Machining of Cemented Carbides," *5th North American Metalworking Research Conference(NAMRC-V)*, pp. 258~263.
- (8) Heuvelman, C. J., 1980, "Summary Reports on the Cooperative Research on Spark- Erosion Machining of Cemented Carbides (Die-Sinking)," *Annals of the CIRP*, Vol. 29, No. 2, pp. 541~544.
- (9) 齋藤長男, 小林和彦, 仙北谷 英次, 1992, "ワイヤカット 放電加工技術," 日刊工業新聞社 pp. 48~57.
- (10) Schumacher, B. M. and Agie, A.G., 1990, "About the Role of Debris in the Gap During Electrical Discharge Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 197~199.
- (11) Dunnebacke, G., 1992, "High Performance Electrical Discharge Machining using Water-based Dielectric," *Proc. of the 10th Int'l. Symp. for Electromachining (ISEM-X)*, pp. 161~169.
- (12) Gadalla, A. M. and Tsai, W., 1989, "Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide-Cobalt Composites," *J. of American Ceramic Society*, Vol. 72, No. 8, pp. 1396~1401.
- (13) 김민건, 지정근, 태원필, 1993, "고경질재료 방전가공부의 피로파괴 특성," 대한기계학회논문집, Vol. 17, No. 1, pp. 21~26.