

방전액의 전도율의 변화에 따른 와이어방전가공의 가공특성

김창호⁺, 강재원*

(논문접수일 2006. 2. 15, 심사완료일 2006. 9. 28)

Machining Characteristics of WEDM due to Electrical Conductivity of Dielectric

Chang-Ho Kim⁺, Jae-Won Kang*

Abstract

This work deals with the electrical conductivity of dielectric on output parameters such as metal removal rate and surface roughness value of a carbon steel(SM25C) and sintered carbides cut by wire electrical discharge machining (WEDM). Dielectric has several functions like insulation, ionization, cooling, the removal of waste metal particles. The presence of minute metal particles(debris) in spark gap contaminates and lowers the breakdown strength of dielectric. And it is considered that too much debris in spark gap is generally believed to be the cause of arcing. Experimental results show that increases of cobalt amount in carbides affects the metal removal rate and worsens the surface quality as a greater quantity of solidified metal deposits on the eroded surface. Lower electrical conductivity of the dielectric results in a lower metal removal rate because the gap between wire electrode and workpiece reduced. Especially, the surface characteristics of rough-cut workpiece and wire electrode were analyzed too. Debris were analyzed also through scanning electron microscopy(SEM) and surface roughness tester. Micro cracks and some of electrode material are found on the workpiece surface by energy dispersive spectrometer(EDS).

Key Words : Wire Electrode(와이어전극), Electrical Conductivity(전기전도율), Dielectric(방전액), Material Removal Rate(공작물 제거율), Sintered Carbide(초경합금)

1. 서론

와이어 방전가공(wire electrical discharge machining:

WEDM)은 방전액속의 음극(주로 와이어전극)과 양극(공작물)사이에서 발생하는 플라즈마 방전현상에 의해 발생하는 높은 열을 이용하여 금속의 표면의 일부를 용융 및 기화하여

* 동의대학교 대학원 기계공학과 (chkim21@dongeui.ac.kr)
주소: 614-714 부산광역시 부산진구 엄광로 995
+ 동의대학교 기계공학과

공작물을 비접촉 절삭가공하는 메커니즘이다. WEDM의 가공방식은 정삭가공 여유량을 감안하여 황삭가공을 한 후 동일한 궤적으로 와이어전극과 공작물간의 간격인 오프셋(offset)을 줄여가면서 가공제품의 요구정도에 따라 2~6회의 정삭가공을 추가하여 최종치수까지 가공한다.

일반적으로 WEDM의 가공성 즉 절삭성은 방전가공기의 전원형태, 가공상의 전기조건, 와이어 전극재의 화학적 조성 및 물리적 성질들에 의해 좌우되며 표면정도 및 정밀도는 전극의 품질 및 방전액의 오염도와 상당한 관련이 있다.

왕덕현 등⁽¹⁾은 풀림 및 용체화처리한 티타늄합금을 전기조건들을 변화시키면서 WEDM 하였을 때의 방전가공특성과 방전가공한 면의 연삭가공 특성을 연구하였다.

임세환 등^(2,3)은 분석이 가능한 다구찌 실험계획법을 이용하여 WEDM의 지식과 경험이 부족해도 WEDM의 가공속도와 표면거칠기 값 등의 성능에 유의한 영향을 미치는 인자들 간의 조합을 찾는 방법을 제시하였다.

Kunieda 등⁽⁴⁾은 극간의 길이와 금속가공분의 체적밀도간의 정량적인 관계와 방전에 의해 발생한 금속가공분의 확산을 연구하였다. 그는 극간의 분사 상태에 따라 극간의 간격은 20~100 μ m였으며 좁은 극간에 방전액을 채운 상태에서 정전력을 주었을 때 금속가공분이 방전전류에 어떤 영향을 미치는지 그 특성을 실험한 뒤 분포에 대한 단순화된 모델을 제시하였다.

B. M. Schumacher 등⁽⁵⁻⁷⁾은 방전갭 내의 금속가공분의 역할에 대한 연구에서 전극과 공작물간의 방전갭이 금속가공분에 의해 오염되면 방전이 발생하는 위치와 갭의 폭 뿐만 아니라 방전점화에 영향을 미친다고 발표하였다. 방전점화는 방전액 내의 금속가공분에 의해 발생하기도 하는데 오염정도가 심할수록 극간이 짧아져서 더 빨리 점화를 일으키며 휴지시간이 짧아지고 방전주기가 빨라지게 되므로 방전가공속도가 증가된다고 하였다.

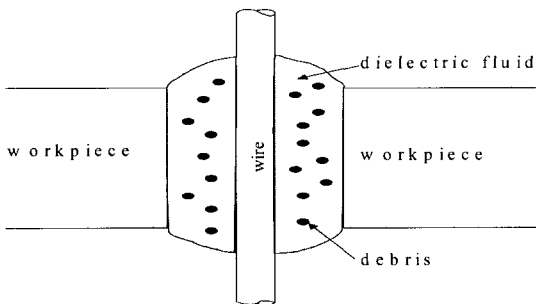


Fig. 1 Dielectric in WEDM

방전과 관련된 이러한 연구들 중 WEDM의 방전액인 탈이온수의 전기전도율의 변화와 방전성능과의 관계를 연구한 한 논문이 없었다.

본 연구는 저탄소강과 Co의 함유량이 다른 3종류의 초경합금을 WEDM하였을 때 방전액인 탈이온수의 전기전도율의 변화가 방전가공속도 및 표면거칠기 등 금속조직상의 변화에 미치는 영향을 실험하였다.

2. 방전액(Dielectric)

형조방전가공에서는 비교적 높은 비등점, 저점도, 화학적 중성, 무독성 등의 특성을 갖춘 파라핀, 경유 등이 주된 방전액으로 사용되고 있다. 절연전압을 얻을 때까지 갖고 있는 높은 절연강도를 가져야하며 스파크 갭에서 방전이 끝난 뒤 곧 탈이온화가 되어야 한다.

방전유는 매우 짧은 시간에 전기적인 절연을 겪으며 인가전압에 의해 음극에서 나온 전자들과 전극갭 내에서 유리하는 전자들은 양극으로 향하여 간다. 이러한 전자들과 방전액 내의 중성자들과의 충돌로 생성된 많은 양이온과 전자들이 각각 약 10 μ m정도의 좁은 플라즈마 간격을 가로질러 음극과 양극으로 도달하게 된다. 경유를 사용하면 스파크의 횡수가 초기에는 균일하게 작지만 방전가공이 진행되는 동안 방전액내에 금속가공분에 의해 갑자기 크게 증가한다.

방전유와는 달리 탈이온수에는 거의 자유전자가 존재하지 않기 때문에 스파크의 숫자가 전압펄스 동안에 일정하게 유지되므로 주로 WEDM에 사용된다.

와이어 방전가공기의 방전액은 Fig. 1과 같이 와이어 전극의 위 아래에서 분사되거나 탱크에 방전액을 채운 상태에서 공작물과 전극간을 절연(insulation), 탈이온화(deionization), 공작물의 냉각 및 방전액내의 금속가공분을 제거하는 등의 역할을 한다⁽⁷⁾.

방전액 시스템의 구성은 방전액내의 금속가공분을 여과시키는 여과 필터부(filter unit)와, 방전액의 전기전도율을 조절하고 탈이온화를 시키는 이온교환기/전도율 제어부(ion exchanger and conductivity control unit)로 나뉘어져 있다.

연속적으로 방전이 진행되면 용융된 금속가공분이 방전액 안으로 유입되어 방전액의 오염도는 양 극간의 갭에 의해 형성되는 전기장에 영향을 미친다.

방전액의 전기장(E(x,y))은 갭과 인가전압의 함수로서 다음의 (1)식과 같이 주어진다⁽⁸⁾.

$$E(x,y) = \frac{U}{Gap(1 - contamination(x,y))} \quad (1)$$

여기서 U 는 양극사이에 인가된 전압(no-load voltage)이며, Gap 은 양극간의 간격으로서, 전극-공작물간 간격에서 극간에 존재하는 금속가공분의 반경을 뺀 것이다.

식 (1)에서 알 수 있듯이 금속가공분이 많아짐에 따라 방전액의 오염도가 증가할수록 전기적인 갭인 전기장은 커지게 된다는 것을 알 수 있다.

음성도체의 전기저항은 그 물체의 길이에 비례하고 단면적에 반비례한다. 모든 물체는 전자적인 구조와 온도에 의존하는 고유한 비저항(specific resistance)을 갖는다. 일반적으로 절연체는 높은 비저항을 갖는다.

물의 전기전도율은 물의 절연성을 표시하는 척도로서 물의 미약한 전류치를 측정하는 전도율($\mu S/cm$) 혹은 비저항치(Ωcm)로 표시한다. 이론적으로 전해질이 거의 없는 완전한 순수(absolutely pure water)는 $0.1 \mu S/cm$ 이하로, 일반적으로 순수의 전기전도율은 $1 \mu S/cm$ 이하로 규정하고 있다. 순수는 전기전도율이 낮기 때문에 전기가 잘 통하지 않지만, 순수 중에 전해질이 포함되면 그것이 전류를 흐르게 하는 매체가 되므로 그 양에 따라서 전기전도율의 변화가 나타난다.

일반적으로 WEDM 업체에서 적용하고 있는 전기전도율은 $20 \sim 50 \mu S/cm$ 이지만 고정밀도의 반도체 리드프레임용 초경합금재의 금형의 경우 $10 \mu S/cm$ 부근에서 가공하고 있다.

3. 실험방법 및 장치

실험에 사용된 와이어방전가공기는 Robofil 2030(스위스 Charmilles사)기종으로서 와이어 이송속도는 $60mm/sec$, 와이어 장력은 $900gf$ 로 고정하였다. 와이어 전극은 직경 $0.25mm$ 의 황동소재(Cu: 65, Zn: 35%)의 표면에 $4 \sim 5 \mu m$ 아연도금된 와이어(Cobraceut A: 독일)를 사용하였다.

실험용 시편은 시편의 폭과 두께가 각각 $5, 10mm$ 인 저탄소강과 Co의 함유량이 각각 $6, 12, 15\%$ 인 3종류의 초경합금(Widia Co. 독일)을 사용하였으며 시편들의 화학적 성분은 Table 1 및 2와 같다. Co의 함유량이 $12, 15\%$ 인 초경합금은 탈륨카바이드(TaC) 및 티타늄 카바이드(TiC)의 함량이 약 3% , 나머지는 텅스텐 카바이드(WC)로 구성되어 있다.

먼저 황삭가공한 시편을 다수 준비한 다음 정삭가공을 1차씩 추가하여 4차까지 차수별로 가공하였다. 추가되는 정

Table 1 Chemical composition of SM25C

Chemical composition(%)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.283	0.261	0.663	0.049	0.057	0.104	0.119	0.042

Table 2 Chemical composition of sintered carbides

Items	Chemical composition(%)		
	Cobalt	TiC+TaC	WC
GT 10	6	-	94
GT 20	12	3	85
GT 30	15	3	82

Table 3 Machining conditions

items		conditions
workpiece (thickness=5mm)		3 sintered carbides (Co 6, 12, 15% respectively)
		low-carbon steel(SM25C)
wire	material	Zn coated CuZn35 brass
	feed rate	60mm/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
di-electric	material	deionized water
	electrical conductivity	5, 10, 15, $20 \mu S/cm$ respectively

삭가공은 차수가 증가할수록 가공조건이 점차 약하게 설정되어 있다.

방전액의 전기전도율은 $5, 10, 15, 20 \mu S/cm$ 의 4종류로 셋팅하여 실험하였다. 전기전도율 값은 제어부의 사용자 선택 모드(User Parameters)중 EXE모드에서 제어되며 실제 가공탱크 내에서 방전액을 측정된 값이 INFO 모드에서 디스플레이 되어 탈이온화 수지탱크에서 전기전도율이 조절된다.

이상과 같이 실험을 위한 공작물 및 전극재료, WEDM회수 등 제반 가공조건은 Table 3과 같다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 방전가공 속도

WEDM 속도(cutting speed: mm²/s) 혹은 공작물 제거율(material removal rate)은 단위시간당 공작물이 제거된 면적으로 정의되며 와이어의 이송속도(mm/s)에 공작물의 높이를 곱한 것이다.

Fig. 2는 시편들을 황삭가공하였을 때 방전액의 전기전도율의 변화에 대한 평균적인 방전가공속도의 변화를 보여준다.

초경합금의 경우 방전액의 전기전도율을 5μS/cm 증가시킬 때마다 가공속도는 약 6%정도씩 증가하였다. 이것은 전기전도율이 증가될수록 방전액내에 부유하는 텅스텐 카바이드 등 금속가공분의 수효를 증가시키고 동시에 극간의 금속가공분과 공작물간의 이차방전이 발생하여 단위시간당 방전발생 횟수가 증가하였기 때문이라고 판단된다.

그러나 방전액의 전기전도율의 변화에 대해 저탄소강의 평균 방전가공속도는 0.75mm²/s로 거의 균일하였으며 초경합금의 0.3mm²/s에 비하여 2.3배 정도 빠른 것을 볼 수 있었다. 이것은 저탄소강의 용융점(1,530°C)이 초경합금의 용융점(2,900~3,500°C)에 비해 낮고, 철 이외의 기타 원소들의 함유량이 1.578%에 불과한 균질의 용융금속이기 때문에 전기전도율의 변화가 가공속도에 크게 영향을 미치지 못했기 때문이라고 생각된다.

그리고 초경합금의 Co함유량이 증가할수록 방전가공속도가 약간 감소하였는데 이것은 Co의 전기전도율이 WC에 비해 낮기 때문에 Co함유량이 많을수록 양 극 간에 공급되는 방전전류가 적어생긴 현상이라고 판단되나 이에 대한 추가적인 연구가 더 필요하다고 본다.

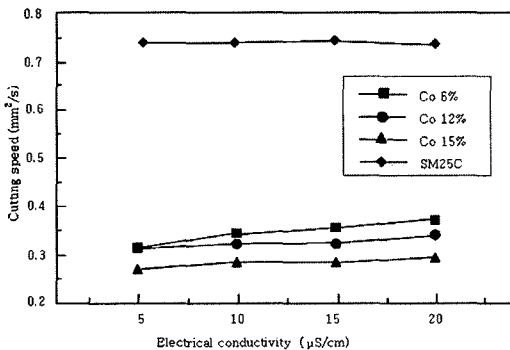


Fig. 2 Electrical conductivity and cutting speed in rough cutting

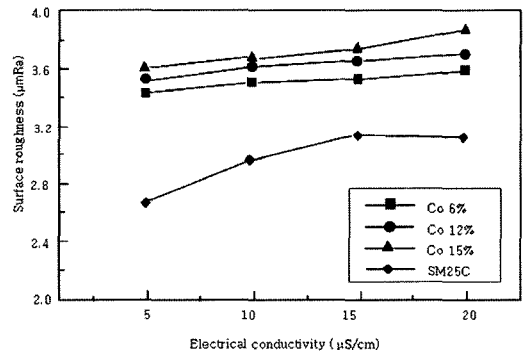
4.2 방전가공면의 표면거칠기 및 특성

WEDM한 시편들을 에폭시(epoxy) 안에서 몰딩한 뒤 다이아몬드 휠로 연마하고 다이아몬드 페이스트(diamond paste)로 폴리싱한 시편의 표면을 Murakami 액으로 에칭하였다.

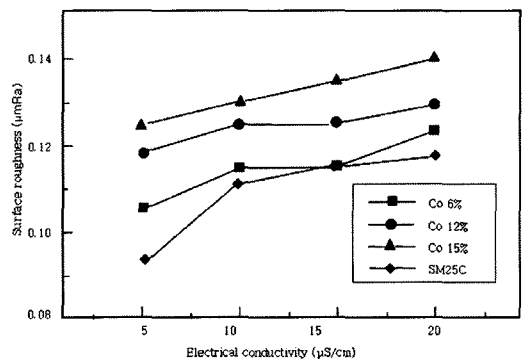
Fig. 3의 (a) 및 (b)는 각각 황삭 및 4차 정삭가공한 단면을 표면거칠기 측정기(Tallysurf-120L)로 간격 1.25μm, 컷 오프 0.8mm의 중심선 평균 거칠기(μmRa)로 나타낸 결과이다.

방전액의 전기전도율이 증가할수록 두 재료의 표면거칠기가 증가하였다. 이것은 방전스파크가 진행할 때 방전액 내에서 공작물 쪽에 가까운 금속가공분과 충돌하여 2차 방전이 발생하여 공작물의 표면에 깊은 자국을 만들어 표면이 거칠게 된 것으로 볼 수 있다. 탄소강에 비해 초경합금의 표면이 거칠게 나타난 것은 WEDM시 발생한 열에 의해 탄소강의 표면은 용해되지만 초경합금의 경우, 소결된 WC 등의 일부 입자가 용해되지 않고 떨어져나갔기 때문이라고 본다.

전기전도율이 낮아질수록 표면거칠기는 향상되지만 방전



(a) Rough cutting



(b) 4th finish cutting

Fig. 3 Co Content and surface roughness

효율이 떨어지기 때문에 요구되는 표면거칠기에 따라 전기 전도율을 최적의 조건으로 제어하는 것이 중요하다.

그리고 초경합금내의 Co함유량이 높을수록 표면거칠기가 거칠게 나타나는 것은 단위 면적당 Co 함유량이 낮은 소재에 비해 더 많은 Co가 소재의 표면으로부터 용융되어 이탈되고 모재에서 용융되지 않은 WC 입자가 표면으로 표출되어 거칠게 된 것으로 판단된다.

또, Fig. 3 (a)의 황삭가공의 경우 Co 6%의 초경합금에서는 전기전도율이 각각 $5\mu S/cm$ 와 $20\mu S/cm$ 에서 가공했을 때의 표면거칠기가 $0.13\mu mRa$ 차이가 났으나, Co 15%의 초경합금에서는 $0.25\mu mRr$ 로, Co의 함유량이 클수록 그 변화의 폭이 크게 나타났다.

초경합금을 물 속에서 WEDM할 경우 Fig. 4와 같이 방전액 속에서 전해화학반응을 일으켜서 이온화 경향이 높은 Co가 Co^{2+} ion으로 방전액 안으로 용출된다. 그 결과 Co를 잃게 된 초경합금의 표면에는 미세한 크랙과 재용융층이 발생한다⁽⁹⁾.



이러한 현상으로 볼 때 Co의 함량이 높은 초경합금일수록 Co의 이탈에 따라 크랙이 생기거나 표면이 거칠게 되고, 결합력의 약화로 표면에서의 경도 및 강도 등의 기계적 성질이 떨어지게 되므로 추가적인 정삭가공이 필요한 것이다.

소재의 표면은 급열 급냉에 의해 담금질 상태가 되며 열응력을 받으면 코발트의 장력이 해제되어 Co 입자가 탈락하면서 크랙이 생긴다.

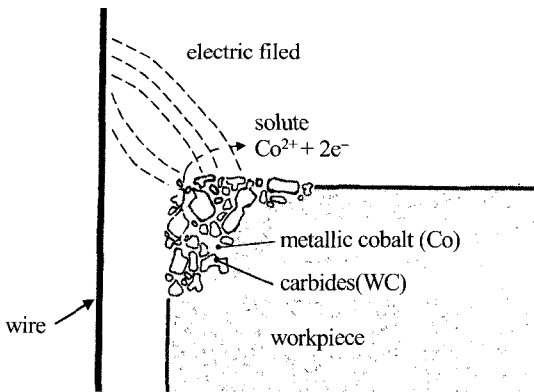
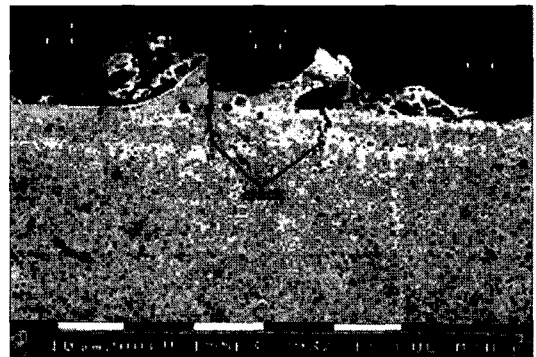


Fig. 4 Electrochemical reaction between wire and sintered carbide

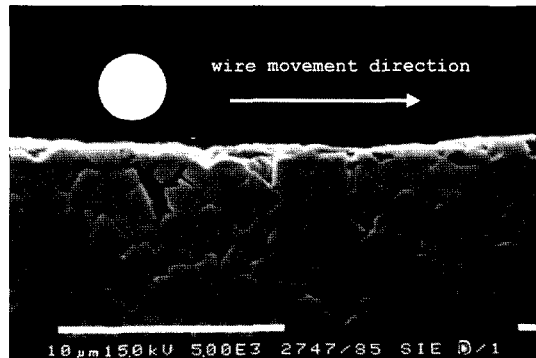
Fig. 5의 (a)와 (b)는 Co 15%의 초경합금을 상단면의 좌측에서 우측으로 황삭 및 정삭조건으로 방전가공하였을 때의 SEM사진이다.

Fig. 5 (a)와 같이 황삭조건으로 WEDM된 표면은 방전액에 의해 용융된 WC와 코발트의 입자의 일부가 방전액 속으로 들어가지 않고 순간적으로 표면에서 재응고된 영역(recast area: $4\sim 8\mu m$ 의 깊이)과 부식이나 크랙이 발생한 영역(eroded or cracked area: 깊이 $6\sim 15\mu m$)을 볼 수 있다. 위의 두 영역 아래는 표면상 변화가 없는 모재영역(intact area)이다.

Fig. 5 (b)는 4차 정삭가공한 뒤의 초경합금 표면사진으로서 삼각형 혹은 사각형의 흰색 입자들은 WC 입자이고, 그 사이의 검게 보이는 부분은 카아바이드 입자들의 결합제인 용융된 Co이다.



(a) Rough cutting



(b) 4th finish cutting

Fig. 5 Surface characteristics of WEDMed sintered carbide(WC 85%, Co 15%, electrical conductivity of dielectric: $10\mu S/cm$)

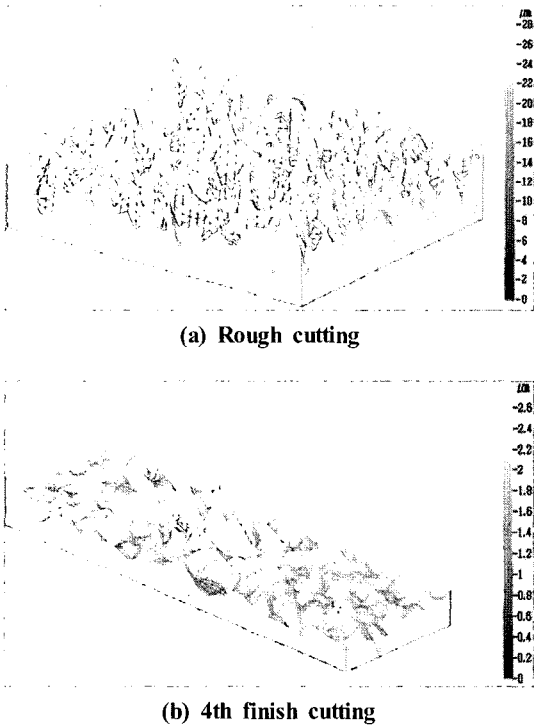


Fig. 6 Surface topography of WEDMed sintered carbide (Co 15%, electrical conductivity of dielectric 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

표면으로부터 1~2 μm 정도의 재용고영역이 있지만, 크랙이나 용융층을 제거함으로써 표면의 경도 및 강도를 향상시킬 수 있었다.

Fig. 6은 방전액의 전기전도율이 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 일 때 황삭과 정삭가공한 초경합금(WC 85%, Co 15%)의 표면의 3차원 형상(topograph)으로서 표면거칠기 측정기(Taylor Hobson사, Tallysurf series 2)에 의해 0.05mm의 간격으로 조사하여 합성하였다.

Fig. 6 (a)에서 볼 수 있듯이 황삭가공된 표면은 방전스파크들에 의해 침탐처럼 형성된 분화구(crater)들은 깊이가 7~8 μm 의 계곡과 봉우리(peak)들로 빼곡하게 이루어져 있다. 이러한 분화구들이 정삭가공에서는 재용고층과 균열층이 거의 제거됨에 따라 Fig. 6 (b)의 깊이 0.3~0.4 μm 의 미세한 언덕으로 변화되었다. 이러한 특징적인 형상들이 Fig. 3과 같은 표면거칠기 값을 결정하게 된다.

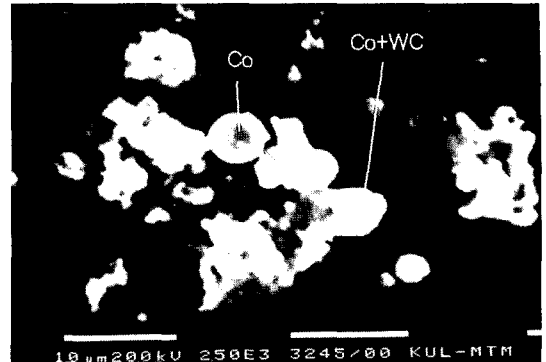


Fig. 7 SEM photograph of debris in WEDM gap(WC 88%, Co 12%, electrical conductivity of dielectric 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

4.3 금속가공분(Debris)

Fig. 7은 방전액의 전기전도율이 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 일 때 코발트 12%인 초경합금을 황삭 WEDM할 때 방전액내의 금속가공분의 SEM사진이다.

EDS(Electro-dispersive spectrometer)분석결과, 구 형태의 Co, WC 및 이들의 용융 혼합물 등 초경합금의 주 성분들과 일부 Cu, Zn 등이 검출되었다. 뒤의 두 성분은 와이어 전극 표면의 일부가 용융되어 방전액 속으로 비산된 것이다.

5. 결론

- (1) 방전액의 전기전도율을 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 증가시킬 때마다 초경합금에 대한 황삭 WEDM의 가공속도는 약 6%정도씩 증가하였다. 저탄소강의 평균 방전가공속도는 0.75 mm^2/s 로 거의 균일하였으며 초경합금의 0.3 mm^2/s 에 비하여 2.3배 정도 빠른 것을 볼 수 있었다.
- (2) 방전액의 전기전도율이 증가할수록 양 극 간에 2차 방전이 발생하여 공작물의 표면에 깊은 자국을 만들어 두 재료 모두 표면거칠기가 증가하였다.
- (3) 방전액의 전기전도율이 높을수록, 초경합금의 Co의 함유량이 클수록, 표면거칠기의 변화의 폭이 크게 나타났다.
- (4) 황삭 WEDM된 초경합금의 표면에는 와이어 전극소재가 발견되었으며 WC와 Co의 재용고층과 크랙이 존재하였다. 이 변질층은 본 실험에 사용된 와이어방전가공기의 경우, 방전가공 옷셋량을 달리한 4회의 정삭가공으로 거의 제거할 수 있었다.

후 기

본 논문은 동의대학교 2004년 교내 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Wang, D. H., Kim, W. I. and Kim, J. U., 2002, "The Characteristics of WEDM and Final Surface Grinding for Titanium Alloy," *Trans. of KSMTE*, Vol. 11, No. 6, pp. 10~16.
- (2) Lim, S. H., Kim, J. H., Lee, W. R. and Park, J. S., 2002, "Optimum Selection of Machining Parameters of WEDM using Taguchi Method," *Proceedings of KSMTE Autumn Conference 2002*, pp. 123~128.
- (3) Gadalla, A. M. and Tsai, W., 1989, "EDM of Tungsten Carbide-Cobalt Composites," *J. of American Ceramic Society*, Vol. 72, No. 8, pp. 1396~1401.
- (4) 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.
- (5) Schumacher, B. M. and Agie, A. G., 1990, "About the Role of Debris in the Gap during EDM," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 197~199.
- (6) Luo, Y. F., 1997, "The Dependence of Inter-face Discharge Transitivity upon the Gap Debris in Precision EDM," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 68, pp. 121~131.
- (7) Dunnebacker, G., 1992, "High Performance EDM using Water- based Dielectric," *Proc. of the 10th Int'l. Symp. for Electromachining (ISEM-X)*, pp. 161~169.
- (8) Bichsel, D. and Kocher, M., 1998, "Contamination Evolution in EDM Sinking," *Proc. of the 12th Int'l. Symp. for Electromachining(ISEM-XII)*, pp. 351~358.
- (9) Maggi, F., 1991, "Wire Cut Electro-Erosion of Hard Metals," *Agie Erosion Technology*, pp. 1~8.