

## WEDM 가공특성에 대한 방전액의 전기전도율의 영향

김창호<sup>†</sup> · 여홍태<sup>\*</sup>

(2003년 5월 14일 접수, 2003년 8월 13일 심사완료)

### Electrical Conductivity of Dielectric on WEDM Characteristics

Chang-Ho Kim and Hong-Tae Yeo

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

#### 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(W-EDM). Dielectric has several functions like insulation, ionization, cooling, the removal of waste metal particles. The presence of minute particles(gap 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).

#### 1. 서론

방전가공(Electrical discharge machining: EDM)은 방전액(dielectric)속의 음극(주로 전극)과 양극(공작물) 사이에 발생하는 플라즈마 방전현상에 의해 발생하는 고열을 이용하여 금속의 표면의 일부를 용융 및 기화하여 공작물을 비접촉 절삭하는 메커니즘이다.<sup>(1)</sup>

형조방전의 경우 비교적 높은 비등점, 저점도, 화학적 중성, 무독성 및 낮은 가격 등을 갖춘 방전유가 요구된다. 파라핀, 경유 혹은 탈이온화수

등이 주된 방전액이며 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 달려간다. 이러한 전자들과 방전액 내의 중성자들과의 충돌로 생성된 많은 양이온과 전자들이 각각 약 10 $\mu$ m 정도의 좁은 플라즈마 간격을 가로질러 음극과 양극으로 도달하게 된다. 경유를 사용하면 스파크의 숫자가 초기에는 균일하게 작지만 갑자기 방전액 내에 금속가공분에 의해 크게 증가한다.

그러나 탈이온화수에는 거의 자유전자가 존재하지 않기 때문에 이와 같은 사태는 일어나지 않고 스파크의 숫자는 전압펄스 동안에 일정하게

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 동의대학교 기계산업시스템공학부  
E-mail : chkim21@dongeui.ac.kr  
TEL : 051) 890-1651, FAX : 051) 890-2232

<sup>\*</sup> 회원, 동의대학교 기계산업시스템공학부 기계공학과

유지되므로 2차원 형상을 가공하는 와이어방전가공에 주로 쓰인다.<sup>(2)</sup>

와이어방전가공(wire-electrical discharge machining : W-EDM)은 정삭가공 여유량을 감안하여 황삭가공을 한 후 동일한 궤적으로 와이어전극과 공작물간의 간격인 오프셋(offset)을 줄여가면서 가공제품의 요구정도에 따라 2~6회의 정삭가공을 추가하여 최종치수까지 가공하는 방식이다.

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

Kunieda 등은 극간의 길이와 방전가공분의 체적밀도간의 정량적인 관계와 방전에 의해 발생한 방전가공분의 확산을 연구하였다. 그는 극간의 분사 상태에 따라 극간의 간격은 20~100 $\mu$ m였으며 좁은 극간 내에 방전액을 채운 상태에서 정전력을 주었을 때 방전가공분이 방전전류에 어떤 영향을 미치는지 그특성을 실험한 뒤 분포에 대한 단순화 된 모델을 제시하였다.<sup>(3)</sup>

B. M. Schumacher 등은 방전분에 의해 전극과 공작물간의 방전갭이 오염되면 방전이 발생하는 위치와 갭의 폭 뿐만 아니라 방전점화에 영향을 미친다고 발표하였다. 방전점화는 방전액 내의 방전분에 의해 시작되기도 하는데 오염정도가 심할수록 극간이 짧아져서 더 빨리 점화를 일으키며 휴지시간이 짧아져서 방전주기가 빨라지므로 방전가공속도가 증가하는 것이다.<sup>(4,5)</sup>

K. Furutani 등은 금속의 표면에 TiC, WC의 두꺼운 층을 만들기 위하여 방전액 내에 미세한, Ti 등의 파우더를 섞어서 방전을 이용한 표면개선방법을 연구하였다. 그 결과 탄소강 표면에 150 $\mu$ m 두께의 TiC 층을 얻었다.<sup>(6)</sup>

본 연구는 방전액인 탈이온화수의 전기전도율의 변화가 저탄소강(SM25C)과 3종류의 초경합금을 WEDM하였을 때 초경합금 내의 결합제인 Co의 함유량과 방전가공속도 및 표면거칠기 등에 미치는 영향을 실험에 의해 규명하고 정밀가공을 위한 최적의 방전조건을 얻고자 하였다. 또한 가공된 공작물의 표면 및 WEDM시 발생한 금속가공분(debris) 등을 SEM과 Kevex EDS로 분석하여 방전가공에 의한 금속조직상의 변화와 그 영향 등을 조사하였다.

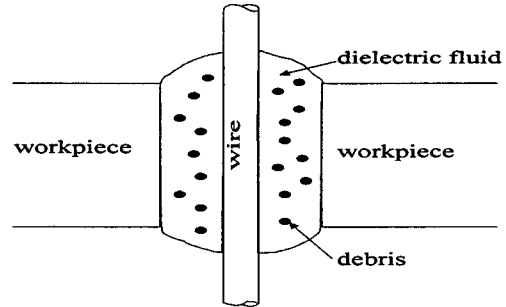


Fig. 1 Dielectric fluid in WEDM

## 2. 방전액(Dielectric fluid)

방전액은 Fig. 1과 같이 전극의 위아래에서 분사되어 공작물과 전극간의 절연(insulation)과 이온화(ionization), 공작물의 냉각 및 금속가공분(debris)의 제거 등의 역할을 한다.<sup>(7)</sup>

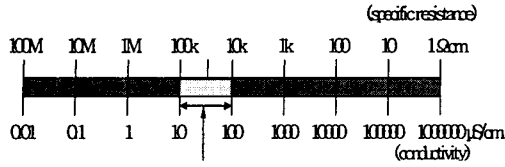
오염도는 전기장에 영향을 미친다. 전기장은 갭과 인가전압의 함수이다. 반면에 스파크는 이전의 스파크에 의해 오염될 때 전기적인 갭은 기계적인 것에 비해 줄어든다. 이것이 오염에 전기장의 의존도를 높이게 한다. 오염입자의 물리적인 형상은 전기장 못지 않게 중요하다.

전기적인 갭은 전극-공작물간 간격에서 국부적인 방전가공 오염 때문에 발생한 debris의 반경을 뺀 것이다. 전기장은 극간에 인가된 전압을 전기적인 갭으로 나눈 값으로 다음의 식 (1)과 같이 주어진다.<sup>(8)</sup>

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

여기서 U는 양극사이에 인가된 전압이며, Gap은 양극간의 간격으로서, 분모가 커질수록, 전기장이 작아지게 된다는 것을 알 수 있다.

도체내에서 전자들은 직선경로로 운동하지 않는다. 대신 전자들은 금속원자들과 반복적인 충돌을 하게 된다. 양단에 전압이 걸린 도체를 생각해 보자. 내부 전기장과 관련된 전기력이 전자를 가속함에 따라 속도를 얻게되고 그 속도는 전기장과 반대방향이 된다. 원자와의 충돌로 전자의 속도는 마구잡이가 되고 결국 전기장과 반대방향의 전자의 속도를 줄어든다. 이러한 과정이 반복되어 이러한 충돌은 마치 내부마찰력과



available range for WEDM  
**Fig. 2** Relationship between electrical conductivity and specific resistance of water

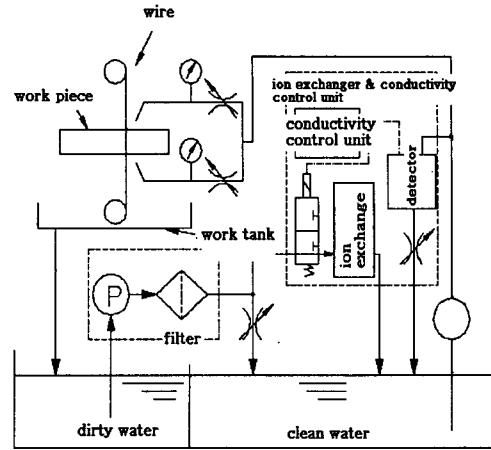
같은 영향을 가지는 원인이 된다. 음성도체의 전기저항은 그물체의 길이에 비례하고 단면적에 반비례한다. 모든 물체는 전자적인 구조와 온도에 의존하는 고유한 비저항을 갖는다. 우수한 전도체는 낮은 비저항을 가지고 우수한 절연체는 높은 비저항을 갖는다. 물의 전기전도율은 물의 절연성을 표시하는 척도로서 물의 미약한 전류치를 측정하는 전도율( $\mu S/cm$ ) 혹은 비저항치( $\Omega cm$ )로 표시하며 다음과 같은 관계가 있다.

$$1 \Omega cm = 1,000,000 \mu S/cm \quad (2)$$

Fig. 2는 물의 비저항치와 전기전도율의 관계 및 WEDM에 적용되는 전기전도율의 범위를 보여주는 것으로 이론적인 순수(pure water)는  $0.1 \mu S/cm$  이하, 일반적으로 순수는  $1 \mu S/cm$  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. WEDM에 적용되는 전기전도율은  $10 \sim 100 \mu S/cm$ 이지만 고정밀도가 요구되는 반도체 리드프레임용 초경합금계의 금형의 경우  $10 \mu S/cm$  부근에서 가공하고 있다.<sup>(9)</sup>

W-EDM에 사용되는 물은 방전액의 절연과피에 의한 방전을 발생시키기 위하여 이온교환용 합성수지로 만들어진 순수기(純水器) 혹은 이온교환장치(ion exchanger)를 통과시켜 수중의 이온을 제거하는 방법으로 순수화(純水化)하여 사용한다.

방전액의 시스템은 Fig. 3과 같이 방전액을 카트리지 필터(cartridge filter)로 여과하는 여과부분과 방전액을 전도율 센서로 검출한 뒤 입력된 전도율로 제어하는 이온교환 및 제어부분으로 나뉘어져 있다. 가공 후의 가공액은 더러운 물통에 회수된 뒤 펌프 P에 의해 여과필터에 가압송급되



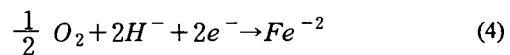
**Fig. 3** Dielectric system

어 금속가공분이 제거된다. 여과된 방전액은 이온을 포함하고 있기 때문에 이온교환 장치(ion exchanger)를 흘러가서 탈이온화 된 맑은 방전액이 방전가공 중인 가공탱크로 공급된다.<sup>(10)</sup>

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.

Fig. 4는 초경합금을 와이어 방전가공할 경우의 전해화학적 현상을 보여주는 것으로서 와이어가 입출력하는 궤적을 따라서 공작물과 와이어 전극간에 집중적인 전기장이 형성되며, 이 때 방전액속에서 전해작용을 일으켜서 WC의 Ti, Ta, Co, V, Mo 등 여러 결합체 중 이온화 경향이 높은 Co가  $Co^{2+}$  ion으로 수중에 용출되므로 결합체인 Co를 잃게되어 초경합금의 표면에는 미세한 크랙과 재용융층이 발생한다.<sup>(11~15)</sup>

강을 와이어 방전가공할 경우, 아래의 식 (3), (4)와 같이, 양극반응에서는 Fe 이온과  $2e^-$  이 결합하여  $Fe^{2+}$  이온이 되며, 음극반응에서는  $\frac{1}{2}O_2$ ,  $2H^+$  및  $2e^-$ 과 결합하여  $H_2O$ 가 된다.<sup>(16)</sup>



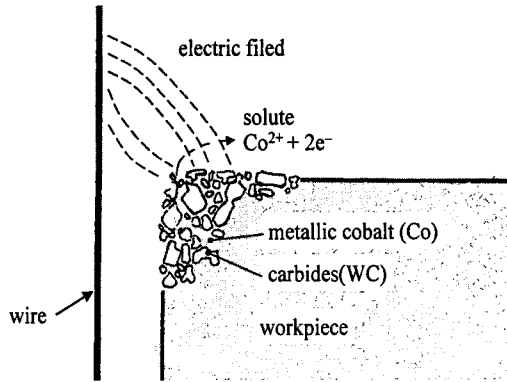


Fig. 4 Electrochemical reaction between wire and sintered carbides

### 3. 실험방법 및 장치

와이어방전가공기는 Robofil 2030기종(스위스 Charmilles사)이며 와이어 이송속도는 60 mm/sec, 와이어 장력은 900gf로 고정하였다. 와이어 전극은 직경 0.25mm의 황동소재(Cu:65, Zn:35%)에 4~5µm 아연 도금된 와이어(Cobraceut A:독일)를 사용하였다.

실험용 시편은 저탄소강(SM25C)과 3종류의 초경합금(Widia Co. 독일)을 사용하였으며 가공하는 폭과 두께가 각각 5, 10mm이다. 초경합금은 Table 1과 같이 Co의 함유량이 각각 6, 12, 15%에 탈륨 카바이드(TaC) 및 티타늄카바이드(TiC)가 일부 약 3% 포함된 것으로 절삭공구 및 프레스 금형 등의 소재에 주로 사용되고 있다. 저탄소강의 화학적 성분은 Table 2와 같이 탄소의 함유량 0.283%이다.

WEDM의 횡수에 대한 표면조도의 변화를 파악하기 위하여 작업메뉴얼의 황삭, 정삭조건을 선택하여 먼저 황삭가공한 시편을 다수 준비한 다음 정삭가공을 1차씩 추가하여 4차까지 차수별로 가공하였다.<sup>(10)</sup> 추가되는 정삭가공의 차수는 차수가 증가할수록 전기조건이 점차 약한 조건이다.

방전액의 전기전도율은 5, 10, 15, 20 µS/cm의 4종류로 셋팅하여 실험하였다. 전기전도율 값은 제어부의 사용자 선택 모드(User Parameters)중 EXE모드에서 제어되며 실제 작업탱크내에서 방전액을 측정된 값이 INFO 모드에서 디스플레이 되어 탈이온화 수지탱크에서 전기전도율이 조절된다.

Table 1 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 2 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 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 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
di-electric	material deionized water
	electrical conductivity 5, 10, 15, 20 µS/cm respectively

실험을 위한 공작물 및 전극재료, WEDM횡수 등 제반 가공조건은 Table 3과 같다.

### 4. 실험결과 및 고찰

WEDM한 시편들을 에폭시(epoxy) 안에서 몰딩한 뒤 여러 단계의 다이아몬드 휠로 연마하고 다이아몬드 페이스트(diamond paste)로 폴리싱하였다. 폴리싱한 시편의 표면을 Murakami 액으로 예칭한 뒤 주사식 전자현미경(JSM-6300, JEOL사)로 방전가공된 금속표면의 조직을, 표면거칠기 측정기(Tallysurf-120L)를 통하여 간격 1.25µm, 컷 오프

값이 0.8mm인 중심선 평균 거칠기 (Ra)로 나타내었다.

4.1 방전가공속도

WEDM속도(mm/s)는 단위시간당 가공면적을 나타내며 와이어 방전가공기의 정밀도, 펄스 ON/OFF시간, 최대전류치 및 무부하전압(no-load voltage), 서어보 전압의 크기 및 방전갭 등의 전기조건에 의해 좌우될 뿐 아니라 공작물의 용융점과 열/전기전도율, 가공궤적 및 방전횟수, 와이어 전극의 재질과 방전액의 전기전도율 등에 의해 좌우된다.

Fig. 5는 방전액의 전기전도율을 각각 5  $\mu$ S/cm, 10  $\mu$ S/cm, 15  $\mu$ S/cm, 및 20  $\mu$ S/cm 로 변화시킨 상태에서 Co의 함유량이 각각 6%, 12%, 15%인 초경합금과 저탄소강(SM25C)을 황삭 가공하였을 때의 방전가공속도의 변화를 보여준다.

초경합금의 경우 초경합금을 전기전도율을 5  $\mu$ S/cm 증가시킬 때마다 가공속도는 약간씩 증가하였다. 이것은 방전액 내에 부유하는 금속가공분(debris)과 공작물간의 이차방전이 발생하여 단위시간당 방전발생 횟수가 증가하였기 때문이라고 판단된다. 또한 방전가공액의 전기전도율이 높을수록 방전갭이 넓어지고 방전의 발생빈도수를 증가시켜 가공하기가 안정되기 때문에 방전속도가 빨라진 것이다.

방전액이 흐르면 와이어가 진동하여 와이어의 진폭이 증가하여 중앙부가 방전에 의해 이온화됨으로써 비저항이 작아져 그 부분에서 발생한 가공분이 이차방전을 일으켜 상하부에 비해 가공량이 많아지기 때문에 가공면의 중앙부가 움푹 들어가는 복현상이 생기기도 한다.

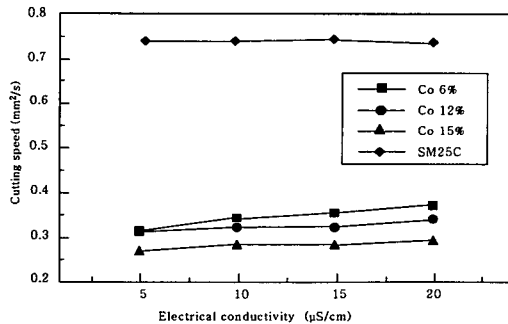
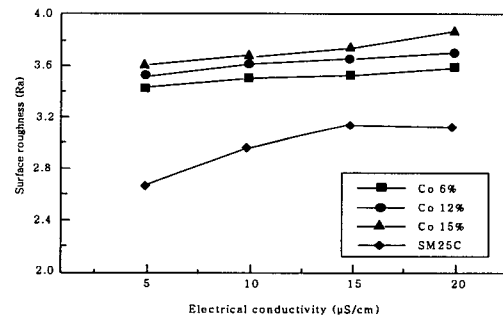


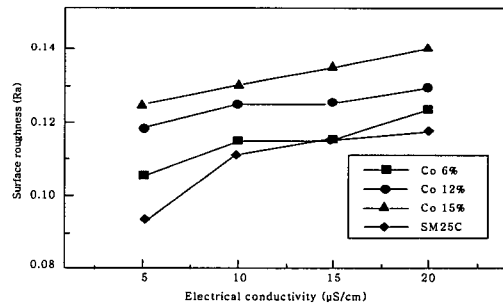
Fig. 5 Electrical conductivity and cutting speed in rough cutting

초경합금의 결합체인 Co함유량이 증가할수록 방전가공속도가 감소하였는데 이것은 합금의 함유량이 많을수록 합금의 함유량이 적은 금속에 비해 전극과 공작물사이에 공급되는 방전전류의 세기가 불안정하여 생긴 현상이라고 판단된다.

또, Fig. 5에서 저탄소강은 전기전도율을 변화에 대해 가공속도의 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 이것은 철 이외의 기타 원소들의 함유량이 1% 이하로서 재료가 균일하기 때문에 방전액의 전기전도율의 변화에도 불구하고 가공속도의 차이가 나지 않는 것으로 여겨진다. 저탄소강의 평균 방전가공속도는 0.7mm/s로서 초경합금의 0.3 mm/s에 비하여 2.3배정도 빠른 것을 볼 수 있다. 이것은 초경합금의 대부분을 차지하는 텅스텐카바이드(WC)의 용융점 2,900 $^{\circ}$ C에 비해 저탄소강의 용융점은 1,530 $^{\circ}$ C은 매우 낮으므로 극간에 발생하는 1회 방전 당 더 많은 양의 금속이 용해되기 때문이라고 생각된다.



(a) Rough cutting



(b) 5th cutting

Fig. 6 Co Content and surface roughness

#### 4.2 방전가공면의 표면거칠기 및 특성

Fig. 6의 (a) 및 (b)는 동일한 조건하에서 황삭 및 4차 정삭가공한 뒤의 가공단면에 대한 표면거칠기의 측정결과이다. 그림에서 방전가공액의 전기전도율이 높을수록 표면이 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.

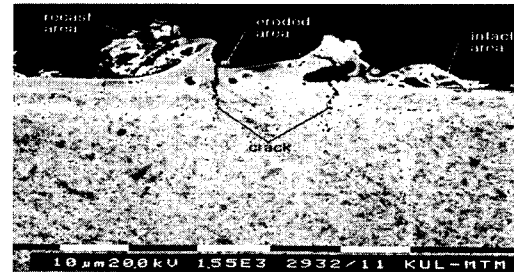
그러나 전기전도율이 너무 낮으면 방전간격이 좁아지게 되고 방전효율이 떨어지기 때문에 이 전기전도율의 제어는 가공성능상 중요한 역할을 하고 있다.

그리고 황삭가공의 경우 많은 양의 금속가공분이 생기고, 이 금속가공분으로 인하여 가공도중에 아크를 발생시키기도 하는데, 이 아크는 방전스파크가 방전액을 통과하여 공작물 쪽으로 진행할 때 물 속의 금속가공분과 충돌하여 2차 방전이 발생하는 것으로 공작물의 표면에 깊은 자국을 만들어 표면거칠기 상태가 불량하게 나타난 것으로 볼 수 있다.

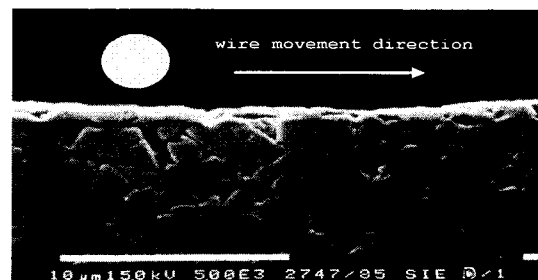
또 방전주(discharge channel)가 넓을수록 극간에 방전에너지가 고르게 분포되어 금속을 용해하며, 방전 갭이 클수록 이상적인 스파크 에너지가 되어 가공물의 표면에 넓고 얇게 가공되므로 보다 양호한 표면거칠기 상태를 얻을 수 있을 것으로 본다.<sup>(17)</sup>

그리고 초경합금내의 Co함유량이 높을수록 표면거칠기가 거칠게 나타나는 것은 단위 면적당 Co 함유량이 낮은 소재에 비해 더 많은 Co가 용융되어 표면으로부터 이탈되어 WC입자가 드러남에 따라 가공표면이 거칠게 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 현상으로 볼 때 WC의 입자가 큰 초경합금일수록 표면이 거칠어지는 현상이 두드러지고, Co의 이탈에 따른 결합력의 약화로 압축강도 등 기계적 성질도 떨어질 것으로 예측된다.

또, 그림에서 1차 황삭가공과 5차 정삭가공의 표면거칠기를 서로 비교해 보면, 1차 황삭가공의 경우 Co의 함유량 6%에서는 전기전도율값 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 가공했을 때와 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 가공했을 때의 표면거칠기가 0.13(Ra) 차이가 난다. 또 Co의 함유량 12%에서는 같은 조건에서 표면거칠기



(a) Rough cutting



(b) 5th cutting

Fig. 7 Surface characteristics of WEDMed sintered carbide (WC 85 %, Co 15 %, Electrical conductivity of dielectric: 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

가 0.15(Ra)의 차이가 나며, 15%에서는 0.25(Ra)의 차이가 나는데 비하여, 5차 정삭가공에서는 변화의 폭이 1/10정도로 작게 나타났다.

이처럼 황삭가공보다 정삭가공에서 표면거칠기의 변화폭이 작은 것은 방전전류를 약하게 함으로써 방전간격이 좁아지게 된다. 따라서 황삭에 비하여 작은 폭발력으로 공작물이 가공될 수 있었기 때문에 방전흔적의 깊이가 얕아진 것으로 분석된다.

Fig. 7의 (a)와 (b)는 Co 12%의 초경합금을 상단면의 좌측에서 우측으로 황삭 및 정삭 방전가공하였을 때의 SEM사진이다.

Fig. 7(a)의 상층부는 방전의 영향을 가장 많이 받는 부분으로서 방전열에 의해 용융된 카아바이드와 코발트가 표면에서 재응고 영역(recast area)이며 방전스파크에 의해 발생한 분화구(crater)도 볼 수 있으며 표면으로부터 약 4~8 $\mu\text{m}$ 의 깊이에 걸쳐 있다.

재응고 영역 아래 부분은 작은 반점 형태의 부식이 생기거나 크랙이 생긴 발생한 영역(깊이 6~15 $\mu\text{m}$ )으로서 맨 위층과 더불어 매우 취약한 지역이다. 이것은 초경합금내의 카아바이드 입자

들을 묶고 있는 코발트의 장력이 방전시 발생한 고열에 의해 해제되어 카아바이드 입자가 탈락하여 생긴 것이다.

소재가 응력을 받으면 크랙이 점차 발전하여 파손을 일으킬 위험이 크며 초경합금과 같이 고온강도가 높은 재료에서 일어나기 쉬운 현상으로 추측된다. 위의 두 부분은 급열급냉에 의해 담금질상태의 특성을 지니게 되어 심한 조직의 변화와 더불어, 잔류응력이 표면층으로부터 상당한 깊이에 걸쳐 존재하며 그 크기도 클 것으로 예상되어 공작물의 피로수명에 막대한 영향을 미칠 것으로 보인다.<sup>(12)</sup> 위의 두영역 아래부분이 크랙이 없는 순수한 모재(intact area)이다.

Fig. 7(b)는 황삭가공한 표면에 같은 가공계적으로 4차의 정삭가공한 뒤의 초경합금 표면사진으로서 삼각형 혹은 사각형의 흰색 입자들은 WC 입자이고, 그 사이의 검게 보이는 부분은 카아바이드 입자들의 결합제인 용융된 Co이다. WC와 Co가 용융된 혼합영역이 표면으로부터 1~2 $\mu$ m 정도의 깊이까지 존재하는 것을 볼 수 있지만, Fig. 7(a)에서 볼 수 있었던 깊은 크랙이나 용융층은 발견할 수 없다. 황삭가공시 표면에 존재한 용융된 와이어 전극소재와 크랙, 재응고층 등은 래핑 등의 폴리싱을 이용하거나 방전가공 옵션량을 달리한 4~5회의 정삭가공으로 제거함으로써 표면의 경도 및 강도를 향상시킬 수 있었다.

Fig. 8(a) 및 (b)는 초경합금(WC 85%, Co 15%)을 황삭과 정삭가공한 표면을 방전액의 전기전도율이 20  $\mu$ S/cm일 때, 표면거칠기 측정기(Taylor Hobson사 Talysurf series 2)로 0.05mm의 간격으로 조사하여 표면거칠기의 형상(topograph)을 3차원으로 나타낸 그림들이다.

두 그림에서 볼 수 있듯이 와이어 방전가공된 표면은 재료가 제거된 계곡(valley)과 인접한 높은 봉우리(peak)들로 구성되어 있다.

표면거칠기 값과 연관시켜서 볼 때 가공속도가 빠른 1차 황삭가공에서 가공속도가 느린 5차 정삭가공으로 갈수록 분화구의 깊이와 폭이 작게 패인 것을 볼 수 있었다. 이것은 전류의 세기와 방전갭 그리고 방전에너지의 크기에 따른 것으로, 황삭에서는 가공속도를 빨리하기 위하여 방전에너지를 크게 하게 되고, 따라서 큰 방전폭발력으로 인하여 가공물의 표면이 깊이 패였으며, 균열도 존재하므로 표면이 거칠게 가공되었다.

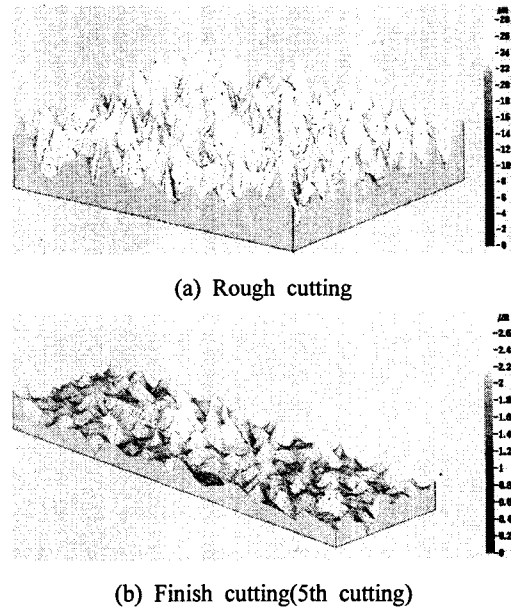


Fig. 8 Surface topography of EDMed sintered carbide(Co 15%, electrical conductivity of dielectric 20  $\mu$ S/cm)

그리고 5차 정삭가공에서는 방전에너지를 작게 함으로써 방전갭과 폭발력이 작은 상태에서 가공되었으므로 Fig. 7(a)에 나타냈던 것과 같은 중간재응고층과 균열층이 거의 제거됨에 따라 보다 매끈한 표면으로 가공된 것이다.

#### 4.3 금속가공분(Debris)

Fig. 9는 코발트12%인 초경합금을 WEDM중인 방전액을 비이커에 담아 금속가공분을 가라앉힌 뒤 3일 동안 건조시켜 SEM으로 찍은 금속가공분의 사진이다. EDS(Electro dispersive spectrometer) 분석결과, 초경합금의 주성분인 구형상의 Co 및 WC와 Co의 용융혼합물이 주로 검출되었다. 또한 Cu, Zn 등이 검출되었는데 이것은 방전작업 도중에 와이어 전극의 일부가 용융되어 방전액 속으로 비산되었기 때문이다.

가공분의 크기는 3~20 $\mu$ m의 다양한 크기의 분포를 이루고 있으므로 가공분 제거용 필터의 mesh를 적절하게 선정하는 것이 가공분을 효과적으로 여과함과 아울러 전기전도율의 제어에 중대한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

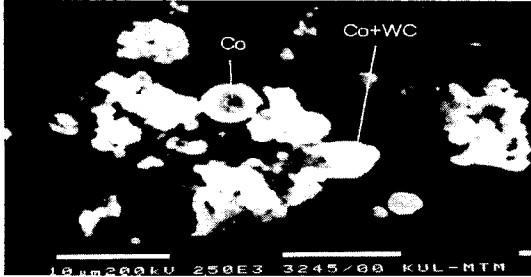


Fig. 9 SEM photograph for debris in W-EDM  
(WC 88%, Co 12%)

## 5. 결 론

(1) 초경합금을 와이어 방전가공할 때 방전액의 전기전도율을  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$  정도 증가시키면 가공속도는 약 6% 정도 증가한다.

(2) 초경합금 내의 Co의 함량이 높을수록 금속가공분이 방전가공된 표면에 많이 부착되어 표면 조도가 거칠게 된다. 전기전도율이 낮을수록 표면 거칠기는 향상되었다. 따라서 표면의 높은 정밀도를 요구하는 공작물은 탈이온화장치 및 카트리지를 최적으로 제어하여 정해진 전도율 이하로 유지하는 것이 바람직하다.

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

(4) 저탄소강(SM25C)은 전기전도율의 변화에 대한 방전가공속도의 차이가 거의 없고, 초경합금에 비하여 약 2.3배 정도 가공속도가 빠르다.

(5) 초경합금에 함유된 Co의 함유량이 10% 정도 증가함에 따라서 1차 황삭가공시에는 7%, 5차 정삭가공에서는 4% 정도 가공속도가 감소한다.

(6) W-EDM에 의하여 발생한 변질층과 균열은 5차의 정삭가공으로 거의 제거할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2003년도 동의대학교 두뇌한국 21 사업(Brain Korea 21)에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- (1) Kang, S. H., Park, W. J. and Bae, S. H., 1993, "A Study on Discharge GAP in CAD/CAM Wire Electric Discharge Mchining," *Trans. of KSME*, Vol. 17, No. 2, pp. 380~384.
- (2) McGeough, J. and Rasmussen, H., 1977, "A Theretical Model of Electrodischarge Texturing," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 68, pp. 172~178.
- (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) Schumacher B. M., and Agie AG, 1990, "About the Role of Debris in the Gap During Electrical Discharge Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 197~199.
- (5) Luo Y. F., 1997, "The Dependence of Interface Discharge Transitivity upon the Gap Debris in Precision Electrodischarge Machining," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 68, pp. 121~131.
- (6) Furutani K., Saneto A., Takezawa H., Mohri N. and Miyake H., 2001, "Accretion of Titanium Carbide by Electrical Discharge Machining with Powder Suspended in Working Fluid," *J. of Int'l Scientist for Precision Engineering and Nanotechnology*, Vol. 25, pp. 138~144.
- (7) Dunnebacker 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.
- (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.
- (10) Chammilles Technologies Co., 1993, *Operating Manual*.
- (11) 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.



- (12) Kim, C. H. and Kruth J. P., 2002, "Influence of the Electrical Conductivity of Dielectric on Machinability of WEDM," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 26, No. 2, pp. 322~328.
- (13) Kim, C. H. and Kruth J. P., 2001, "Influence of the Electrical Conductivity of Dielectric on WEDM of Sintered Carbide," *KSME Int'l Journal*, Vol.15, No. 12, pp. 1676~1682.
- (14) Maggi F., 1991, "Wire cut Electro-Erosion of Hard Metals," *Agie Erosion Technology*, pp. 1~8.
- (15) Kobashi K., 1995, "The Present and Future Developments of EDM & ECM," *Proc. of the 10th Int'l. Symp. for Electromachining(ISEM-XI)*, pp. 161~169.
- (16) 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.
- (17) Kim, M. G., Ki, J. K. and Tai, W. P., 1993, "Fatigue Fracture Characteristics at a Electric Discharge Mchined Surface in High Strength Steel," *Trans. of KSME*, Vol. 17, No. 1, pp. 21~26.