대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 C pp. 64~70 KSME 01S289

방전액의 전도율이 와이어방전가공성에 미치는 영향

김창호*· 허관도*, 권택환**

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

Chang-Ho Kim, Kwan-Do Hur, Taek-Hwan Kwon

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 and cobalt percentage on output parameters such as metal removal rate and surface roughness value of sintered carbides cut by wire-electrical discharge machining (W-EDM). To obtain a precise workpiece with good quality, some extra repetitive finish cuts along the rough cutting contour are necessary. 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 higher metal removal rate as the gap between wire electrode and workpiece reduced. Especially, the surface characteristics of rough-cut workpiece and wire electrode were analyzed too. To obtain a good surface equality without cracks, 4 finish-cuts were necessary by reducing the electrical energy and the offset value.

1. 서 론

와이어방전가공(Wire Electrode Discahrge Machining: W-EDM)은 Fig. 1과 같이 방전액(dielectric)속의 음극(주로 와이어전극)과 양극(공작물)사이에 발생하는 plasma방전현상에 의해 약 8,000~12,000℃초고온의 열이 발생하는데 이 열이 집중되어 금속의 표면의 일부가 용융 및 기화하여 공작물을 비접촉 절삭하는 메커니즘이다. 전극인 와이어(Ø0.03~0.3㎜)에 장력을 준 상태에서 와이어를 공급하면 공작물과 전극사이에 발생하는 방전에너지로 2차원의 윤곽형상을 가공하는 것이다. 와이어방전가공은 정삭가공 여유량을 감안하여 황삭가공(main cut)을 한 후 동일한 궤적으로 전극과 공작물간의 간격인 옵셋량(offset)을 줄여가면서 가공제품의 요구정도에 따라 2~6회의 정삭가공(second cut)을 통하여 최종치수까지 가공하는 방식이다.[1]

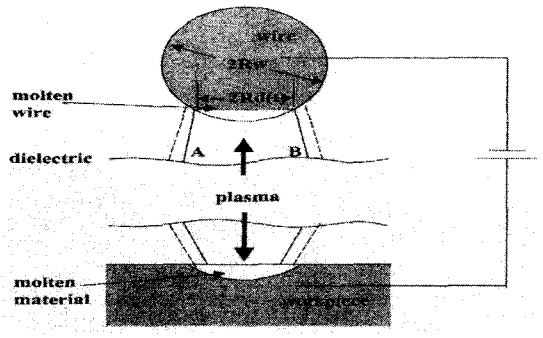


Fig. 1 Physical Model of WEDM

* 동의대학교 기계산업시스템공학부
** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

일반적으로 WEDM의 가공성 즉 절삭성과 마모는 방전가공기의 전원형태, 작업상의 전기조건, 와이어소재 와이어 전극재의 화학적 조성, 물리적 성질들에 의해 좌우되며 표면정도 및 공차 제어(clearance control)는 전극의 품질과 상당한 관련이 있다. 왜냐하면 전류가 잘 흐를 수 있는 전기전도율 과 단선을 피할 수 있는 충분한 인장강도 등을 갖고 있어야 하기 때문이다. 공구인 와이어의 재질은 와이어방전가공기의 전기조건들과 잘 결합되었을 때 그 효율이 극대화될 수 있다.[2] 와이어재료의 용융점과 기화압력이 낮으면 이온화시간(ionization time)이 짧게되어 방전이 효율적으로 진행되므로 맞은 용융점과 기화압력을 가진 소재의 와이어가 바람직하다. 현재 널리쓰이는 와이어는 황동선(Cu63%, Zn37%)으로서 순동에 37%의 아연을 첨가시켜 순동선의 인장강도를 보강하기 위하여 개발된 비교적 우수한 전도율(29 IACS)로서 동의 3배 이상되는 기계적성질 및 인장강도를 갖고있을 뿐 아니라 만족할 만한 표면조도를 얻을 수 있게 되었다.

또 동선이나 황동선의 표면에 아연, 산화아연(ZnO) 혹은 황동으로 5~30㎛ 도금된 와이어나 표면이 다공성(多孔性)구조를 가진 와이어의 개발로 방전시 발생한 가공분(加工粉:debris)을 포집하는 공간이 세정하는 능력이 뛰어남은 물론 냉각효과가 증가하였다.[3]~[6]

2. 와이어방전용 가공액(Dielectric)

와이어방전가공에 사용되는 가공액은 공작물과 전극간의 절연(insulation)과 탈이온화(ionization), 공작물의 냉각 및 금속가공입자의 제거 등의 역할을 한다.[7]

방전액의 가장 중요한 기능중의 하나는 공작물을 전극으로부터 절연시키는 것으로서 방전은 가능한 한 좁은 극간에서 일어난다. 공작물과 전극간의 전기장이 생성할 수 있는 최적의 조건이 가능한 빨리 만들어진 다음에 가공궤적을 제공해야 한다.

또한 방전액은 전극과 공작물 둘 다 냉각시켜 줌으로서 와이어의 마모 및 단선이 일어나지 않는다. 또한 방전시 발생한 8,000~12,000℃의 고온의 스파크 공작물을 녹이게 되고 표면에 용융된 금속의 일부는 방전액 속에서 응축되어 방전액 속으로 비산하게 된다.

방전액은 일반적으로 수중의 이온이 제거된 탈이온화수(deionized water) 즉 순수(pure water)를 사용하며 이것은 기계에 부착된 탈이온화 필터 및 제어장치를 통하여 제어된다. 순수는 전기가 잘 통하지않지만 이 순수중에 전해질이 포함되면 그것이 전류를 흐르게 하는 매체가 되고 그 양에 따라 전기전도율 혹은 비저항치에 변화가 생긴다.

전기전도율은 물의 절연성을 표시하는 척도로서 가공액에 흐르는 미약한 전류치를 측정하여 전도율($\mu S/cm$)로 표시하며 비저항치(Ωcm)로 표시하기도 한다. ($\mu S/cm$, $1\mu S/cm = 10^6 \Omega cm$) 와이어방전가공에 쓰이는 방전액의 전기전도율의 범위는 일반적으로 10~100 $\mu S/cm$정도이며 가공성능(가공속도, 가공면조도 등)에 영향을 미치기 때문에 요구하는 정밀도, 와이어의 직경 및 공작물의 재질에 따라 적절한 수치를 선정하여 탈이온화장치에서 제어할 수 있어야 한다.

왜냐하면 방전가공할 때 발생한 높은 열에 의해 용해된 금속의 일부는 방전기헤드의 플라싱노즐에서 분사되는 방전액에 의해 미세한 구슬모양으로 비산하여 방전액 안으로 확산되면서 방전액은 혼탁해짐과 동시에 방전액의 전도율이 점점 높아져간다.

가공액내의 탈이온화 필터링을 잘 제어하지 못하게 되면 공작물과 와이어간의 간격(gap)내에 매우 많은 금속가공분(加工紛debris)이 많아져서 절연을 방해하고 가공도중에 아크를 발생시키기도 한다. 방전작업이 진행될 때 스파크가 물을 통과하여 공작물 쪽으로 진행할 때 물 속의 가공분과 부딪쳐서 방전이 진행되어 심각하게 아크가 발생하는 경우도 있다. 이 아크는 공작물의 표면에 깊은 자국을 만들어 표면불량을 생기게하기도 함과 동시에 작업능률을 떨어지게 한다. 오염된 물로 상하 플라싱을 할 때는 구멍이 연속적으로 발생하기도 한다. 대형 공작물을 가공할 경우 금속가공분이 심각할 정도의 크랙을 만들기도 한다는 보고도 있다.[8,9]

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)	Ther. expansion ($\mu m/m℃$)	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

한 번의 방전이 끝나면 곧이어 방전궤적을 따라서 그 다음의 방전작업이 진행될 수 있도록 탈이온화가 가능한 빨리 진행될 때 고 에너지 밀도(high energy density)가 얻어지면서 방전효율을 높일 수 있는 것이다. 일반적으로 탈이온화수를 방전액으로 사용하고 있으나 일부 일본 방전기의 경우 2개의 분리된 탱크내에 방전가공유와 탈이온화수를 따로 넣고 공작물의 재질 및 표면정도에 따라 선택하여 사용가능하도록 제작된 기계도 있다.

본 연구는 Co의 함유량이 다른 3종류의 초경합금을 WEDM 가공하였을 때 방전액인 탈이온화수의 전기전도율의 변화가 가공속도 및 표면특성에 미치는 영향을 실험하였다.

3. 실험방법 및 장치

실험용 시편은 Table 1과 같이 Co의 함유량이 각각 6, 12, 15%인 3종류의 초경합금(Widia Co. 독일)을 사용하였으며 가공하는 폭과 높이가 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㎛ 아연도금된 와이어를 (cobracut A:독일) 사용하였다.

방전가공의 횟수에 대한 표면조도의 변화를 파악하기 위하여 Operating manual상[10]의 황삭, 정삭조건을 선택하여 먼저 황삭가공(rough cutting)한 시편을 다수 준비한 다음 정삭가공(finish cutting)을 1차씩 추가하여 4차까지 차수별로 가공하였다. 방전액은 전기전도율의 변화가 표면특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전도율이 5, 10, 15, 20 $\mu S/cm$인 4종류의 탈이온화수를 사용하였다.

실험을 위한 공작물 및 전극, 작업회수 등 제반 가공조건은 Table2와 같다.

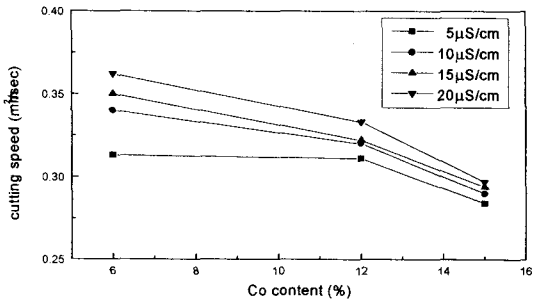
Table 2 Machining Conditions

items		kinds
workpiece	kinds	WC : 3 types (Co 6,12,15 %)
	height(mm)	4 types (10, 20, 30, 50)
electrical conductivity($\mu S/cm$)		4 types (5, 10, 15, 20 $\mu S/cm$)
wire	base material	CuZn37 brass
	coating	4㎛ Zn
	feed rate	60 mm/sec
	tension	900 gf
cutting regime		5 types : main cut, main + finish cut (1), main + finish cut (2), main + finish cut (3), main + finish cut (4)
W-EDM Machine		Robofil 2000 (Charmilles Co., Swiss)

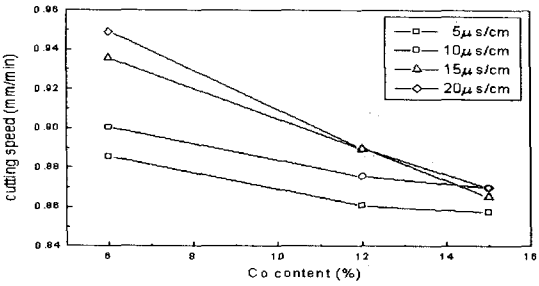
4. 실험결과 및 고찰

다양한 조건하에서 와이어 방전가공한 시편들

을 에폭시(epoxy) 안에서 몰딩한 뒤 다이아몬드 휠로 연마하고 다이아몬드페이스트(diamond paste)로 폴리싱(polishing)하였다. polishing한 시편의 표면을 Murakami 액으로 에칭한 뒤 공구현미경, 주사식 전자현미경(JSM-6300, 일본JEOL사) 및 표면조도측정기(Tallysurf-120L)를 통하여 금속표면의 조직과 표면조도 등 가공특성을 조사하였다. 표면조도는 간격1.25㎛, cutoff 길이 0.8㎜를 기준의 Ra로 나타내었다.



(a) Rough cutting



(b) Finish cutting

Fig. 2 Relationship between Electrical Conductivity and Cutting Speed

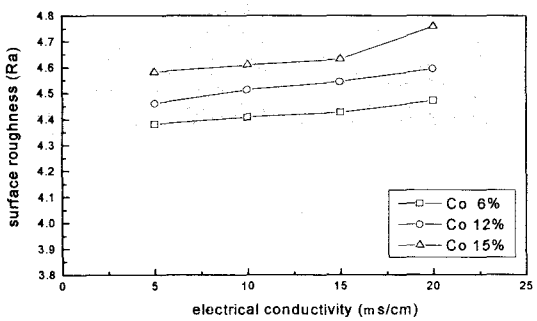
4.1. 전기전도율과 방전가공속도

전기전도율의 변화에 따라 공작물을 황삭 및 4차의 정삭가공하였을 때의 방전가공속도(㎜/min)를 스톱워치로 측정한 결과가 각각 Fig. 2(a) 및 (b)이다.

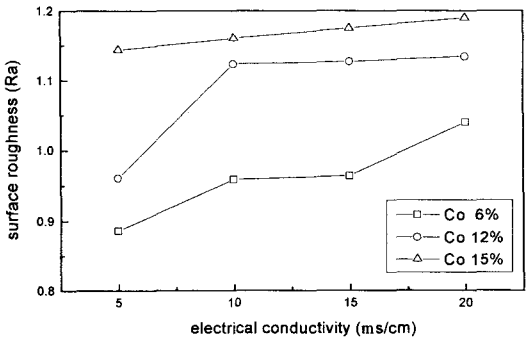
황삭 및 정삭가공 모두 방전액의 전기전도율이 높아질수록 방전속도가 증가하였는데 이것은 전기전도율이 20 $\mu S/cm$ 이하인 경우로서 방전액 속에 존재하는 방전가공분이 전극과 공작물 사이에서 2차방전을 발생시켜 방전 발생횟수를 증가시킴으로 발생한 결과라 생각한다. 그러나 방전액내에 부유하는 가공분을 필터로 잘 여과하지 못하면 전도율이 상승하게 되는데 20 $\mu S/cm$이상이 되면, 가공분이 방전전류의 흐름을 방해하여 방전능률이 떨어지거나 방전작업 도중에 와이어가 단선될 위험이 있다.

4.2. 방전가공면의 표면조도 및 특성

Fig. 3의 (a) 및 (b)는 동일한 조건하에서 황삭 및 정삭가공한 뒤의 가공단면에 대한 표면조도의 측정결과이다. 방전가공액의 전기전도율이 높을수록 표면조도는 거칠게 나타났는데 이것은 방전이 발생시 와이어전극과 공작물간의 전기장사이에서 방전액내의 부유하는 금속입자가 2차방전을 일으켜 금속입자의 일부가 공작물의 표면에 용착되었기 때문이라고 생각된다.



(a) Rough cutting



(b) Finish cutting

Fig. 3 Co Content and Surface Roughness

또 초경합금내의 Co함량이 높을수록 표면조도가 거칠게 나타난 것은 단위면적당 Co함량이 높은 소재에서 더 많은 량의 Co가 용융되어 표면으로부터 유리하면서 WC의 입자만이 남게되어 생긴 현상이 라고 생각된다. 그리고 Co의 이탈에 따라 WC의 결합력이 약화되므로 압축강도 등 기계적성질이 떨어진다.[11]

(a) by Rough Cutting

(b) by Finish Cutting

Fig. 4 Surface Characteristics of WEDMed Workpiece(WC 90%, Co 10%, electrical conductivity of dielectric: 10 $\mu S/cm$)

Co 12%의 소재를 상단면의 좌측에서 우측으로 황삭 방전가공하였을 때 Fig. 4(a)과 같이 가공단면을 3단계의 층으로 구분할 수 있다.[12,13]

방전의 영향을 가장 많이 받은 맨 위층은 방전열에 의해 용융된 텅스텐과 코발트가 일부는 방전액 속으로 흘러 들어가고 나머지는 표면에서 재응고된 영역(recast area)으로서 약 2~8㎛의 깊이를 보여주고 있다.

그 아래 부분이 작은 반점 형태의 부식현상(pit) 및 크랙이 발생한 영역(eroded area: cobalt depleted area, 깊이 6~15㎛)으로서 이 영역에서는 WC입자들을 결합하고 있는 코발트가 용출됨으로 크랙이 발생한 것으로서 맨 위층과 더불어 매우 취약한 지역이다. 맨 아래부분이 열영향을 받지않은 순수한 모재(intact area: base matal)로 나뉘어진다.

초경합금은 소결공정 동안 높은 표면장력으로 카아바이드 입자들을 단단한 골격구조로 끌어당기고 있는 코발트가 수축하면 보다 큰 장력으로 입자들을 당긴다. 그러나 초경소재를 방전하면, 방전열로 인하여 입자들간의 장력이 해제되어 텅스텐카아바이드 입자가 공작물로부터 자유로이 이탈하여 크랙이 생기게 되는 것이다. 이러한 황삭방전 가공표면의 변질층은 취성이 크고 크랙이 있으므로 소재가 응력을 받으면 크랙이 점차 발전하여 파손을 일으킬 위험이 크다. 따라서 방전가공한 부위의 금형의 수명을 늘리고 표면이 정밀한 제품의 성형을 위해선 황삭과 동일한 궤적으로 방전가공 옵셋량을 달리한 4~5회의 정삭가공을 추가하여 변질층을 제거해야한다. 그 외에 래핑(lapping), 연마재 유동성형(extrude -honing) 등을 이용하여 변질층을 제거하는 방법도 있다.

크랙들은 일반적으로 가공단면에 대해 수직방향으로 진행하였으나 수직으로 시작하다가 가공단면과 평행하거나 임의의 방향으로 진행하는 크랙들도 있었다. Fig. 4(b)는 4차의 정삭가공한 후의 표면으로서 WC와 Co가 용융된 혼합영역이 표면에 1~2㎛정도 존재하였으나 크랙은 거의 제거되었다.

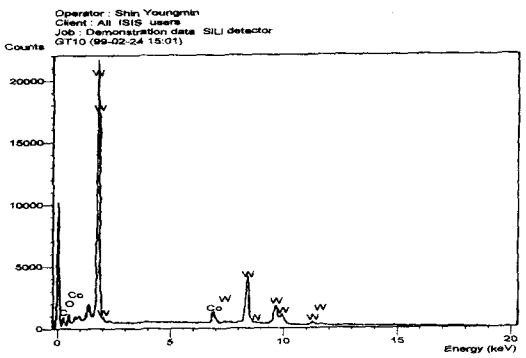


Fig. 5 X-ray Diffraction Pattern obtained from WEDMed Surface

Co 6 %의 초경합금을 황삭 방전가공에 의해 형성된 공작물의 표면을 EDS(Energy Dispersive

Spectrometer: JSM-6300, JEOL 사)로 분석한 결과로서 Fig. 5와 같이 Co 6.69%, Cu2.18%, W 91.13%로 나타났다. Cu가 검출된 것은 방전시 용해된 wire전극의 일부가 표면에 부착된 것이다. 따라서 이와 같이 공작물의 표면에 용착된 전극의 일부는 공작물의 표면강도 및 경도를 저하시키므로 래핑 혹은 polishing 등에 의해 반드시 제거해야 한다.

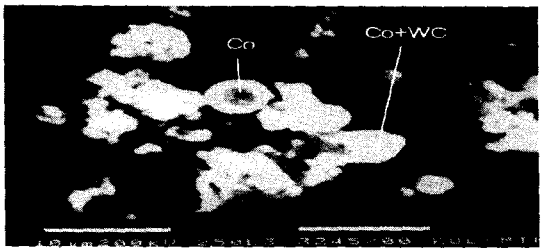


Fig. 6 SEM photograph for debris in W-EDM (WC 88%, Co 12%)

Fig. 6은 코발트12%인 초경합금 소재를 방전가공할 때의 금속가공분(debris)에 대한 EDS 분석결과, 초경합금의 주성분인 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 1~10㎛의 다양한 크기의 분포를 이루고 있으므로 가공분 제거용 filter의 입도를 적절하게 선정하는 것이 가공분을 효과적으로 여과함과 아울러 전기전도율의 제어에 중대한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

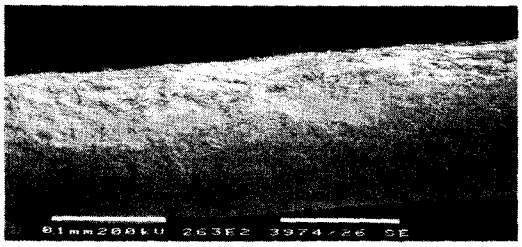


Fig. 7 Wire Electrode after WEDM

공작물과 일정한 갭을 두고 형성된 전기장에 의해 발생한 방전스파크에 의해 전극표면의 일부가 Fig. 7의 상부에서 볼 수 있는 것처럼 용융된 것을 볼 수 있으며 이 용융된 부분은 본 논문 서론 Fig. 1의 공작물과 마주보고 있는 용융부(molten area)에 해당된다. 이와 같이 용융된 금속은 방전액속으로 흘러 들어가 일부는 공작물의 표면에 부착되거나 전극표면에 재응고된다.

5. 결 론

(1) 전도율이 낮을수록 면조도는 향상되었으나 방전가공속도는 감소하였다. 따라서 표면의 높은 정밀도를 요구하는 공작물은 전도율을 10 $\mu S/cm$ 이하로 유지하는 것이 바람직하다. 그러나 전도율을 낮게 유지하기 위해선 새 이온교환수지로 자주 교환해야 하므로 방전효율이 떨어진다.

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

(3) 방전된 공작물의 표면에도 와이어 진행방향 쪽으로 많은 양의 Cu가 부착되어 있었다. 이러한 부착물은 공작물의 경도와 강도를 저하시키므로 lapping이나 연마에 의해 제거해야 한다.

(4) 황삭방전 가공표면의 변질층은 취성이 크고 크랙이 있으므로 소재가 응력을 받으면 크랙이 점차 발전하여 파손을 일으킬 위험이 크다. 따라서 방전가공한 금형의 수명을 늘리고 정밀성형을 위해선 동일한 궤적으로 방전가공 옵셋량을 달리한 4~5회의 정삭가공을 추가하거나 래핑(lapping), 연마재 유동성형(extrude-honing)등을 통하여 변질층을 제거해야한다.

참고문헌

1. 김창호, 1992, "방전가공", 기전연구사.
2. D.F. Dauw and L. Albert, 1992, " About the Evolution of Wire Tool Performance in Wire EDM", Annals of the CIRP Vol.41, No.1, pp. 221-225.

3. H. Sho, T. Orino and M. Fukui, 1989, "The Effect of Electrode Materials on the Characteristics of Machinability of Wire Electrode- Discharge Machines", Proc. of ISEM-IX, pp. 219-222.
4. W. Konig, D.F. Dauw, G. Levy and U. Panten, 1988, "EDM: Future Steps towards the Machining of Ceramics", Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 3, pp. 625-641.
5. M. Jennes, W. Dekeyser and R. Snoeys, 1984, "Comparison of Various Approaches to Model the Thermal Load on the EDM Wire Electrode", Annals of the CIRP, Vol. 33 No. 1, pp. 93-98.
6. J. Prohaszka, A.G. Mamalis and N.M. Vaxevanidis, 1997, "The Effect of Electrode Materials on the Machinability in WEDM", J. of Materials Processing Technology, Vol. 69, pp. 233-237.
7. M. Storr, 1992, "New Dielectric Medium IONOPLUS IME-MM", Proc. of the 10th Inter. Symp. for Electromachining(ISEM-X), pp. 161-169.
8. G. Dunnebacke, 1992, "High Performance Electrical Discharge Machining using Water-based Dielectic", Proc. of the 10th Inter. Symp. for Electromachining(ISEM-X), pp.161-169.
9. Y.F. Luo, 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.
10. Charmilles Technologies Co., 1993, Operating Manual.
11. 김창호, J.P. Kruth, 1999, "초경합금의 와이어 방전가공 가공성 및 표면특성", 한국정밀공학회지, 제16권 제8호, pp.100-105.
12. F. Maggi, 1991, "Wire Cut Electro-Erosion of Hard Metals", Agie Erosion Technology, April.
13. H. Cornelissen, R. Snoeys and J.P. Kruth, 1977, "Investigation on the Optimal Machining Conditions for Electro-Discharge Machining of Cemented Carbides", 5th North American Metalworking Research Conference(NAMRC -5), pp. 258-263.