

다결정 다이아몬드의 와이어방전가공에 관한 연구

김창호[#], 강재원*, 오장욱**, 서재봉***

The Study on the WEDM of Polycrystalline Diamond

Chang-Ho Kim[#], Jae-Won Kang*, Jang-Uk Oh**, Jae-Bong Seo***

ABSTRACT

Polycrystalline diamonds(PCD) tools are widely used in machining a large variety of advanced materials. However, the manufacture of PCD tool blanks is not an economical process. The shaping of PCD blanks with conventional machining methods(such a grinding) is long, labor-intensive process. This paper reports experimental investigation of the influence of electrical machining conditions on the metal removal rate of WEDM of PCD. Experimental results show that the longer pulse-on time and the shorter pulse-off time increase the metal removal rate and worsen the surface quality. The smaller grain size of diamond yields the metal removal rate and shows the better surface quality. Higher electrical conductivity of water yields worse surface roughness.

Key Words : Polycrystalline diamonds(PCD), removal rate(가공속도), wire electrical discharge machining(WEDM)

1. 서 론

다결정 다이아몬드(Polycrystalline diamond: PCD)는 복합재료로서 Si-Al합금, 플라스틱 레진, 초경합금, 광섬유, 복합재료, 고무, 구리합금, 나무 등 다양한 소재들을 절삭하는 등 그 응용분야가 매우 광범위하다. 초경합금의 연마재 공구의 재료로서 초기에는 단결정 다이아몬드를 사용하였으나 너무 고가이므로 공업용 합성 다이아몬드를 이용하여 PCD공구의 재료로 사용한다.⁽¹⁾

절삭용 PCD공구는 마찰이 작고, 내마모성이 크며 예리한 절삭날을 유지할 수 있다. 따라서 우수한 표

면정도와 치수정확도가 요구되는 곳에 사용되고 있으며 특히 연한 비철합금과 연마성이 큰 비금속재료들의 절삭작업에 효과적으로 사용되고 있다.

PCD는 1평방인치당 백만 파운드의 엄청난 고압과 1,600℃ 고온을 받는 압력용기와 밀폐 시스템하에 흑연(graphite)과 같은 순수탄소를 철, 니켈, 코발트, 또는 이 금속들의 혼합물과 용융하여 강력한 순간폭발에 의해서 Fig.1과 같은 공업용 합성 다이아몬드 분말이 생성된다.

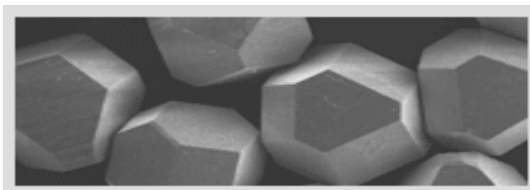


Fig. 1 Polycrystalline diamond powder

교신저자: 동의대학교 기계공학과 chkim21@deu.ac.kr

* 동의대학교 대학원 기계공학과

** 일진 다이아몬드(주),

***에이스 다이아몬드(주)

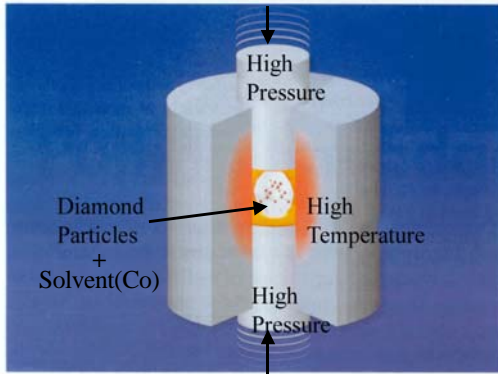


Fig. 2 Manufacturing of PCD blank

PCD 공구 원판(blank)의 제조 원리는 Fig. 2와 같다. 고온고압을 견딜 수 있는 장치 내에 초경합금 기층(substrate)을 놓고 그 위에 미세하게 분쇄된 인조 다이아몬드 분말(평균 입자의 크기가 2~20 μm 범위)들을 위치시키고 5.5~6GPa의 높은 압력과 1400~1500 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도(high-pressure high-temperature : HPHT)로 적정한 시간을 유지시킨 다음, 냉각과정을 거친 뒤 상온에서 냉각시킨다.

다이아몬드 입자들과 초경합금 기층이 고온고압상태에서 수분동안 있게 되면 소결(sintering)이 이루어진다. 이 과정에서 분말내부의 기공과 표면적이 감소하게 되며 액상소결이라는 더 빠른 형태의 소결방식으로 용융된 금속이 기공을 채우고 자립간의 결합을 촉진시킨다. HPHT 동안 다이아몬드 층을 통하여 코발트가 이전되어 다이아몬드와 모재간의 화학적 기계적 결합이 가능하게 되는 것이다.⁽²⁾⁻⁽⁴⁾



Fig. 3 PCD tool Blanks for machining

Fig. 3은 HPHT 과정을 거쳐 소결된 원판형 PCD 원판(blank)이다. 일반적으로 선반이나 밀링용 PCD 공구는 throw away(T/W)식 공구로 사용되는데 공구의 자루(shank)에 인서트(insert)를 용접시켜 사용한다. 인서트의 형상은 일반적으로 Fig. 3과 같이 사각형, 원형, 마름모꼴 등 원하는 형상대로 원형의 원판으로부터 와이어방전가공(WEDM)으로 절단하여 용접한 뒤 정삭으로 연마한다.

최근에는 후가공인 연삭이 필요 없는 PCD전용 와이어 방전가공기의 탄생으로 가공시간이 훨씬 단축되었다.

다이아몬드층은 고가이며 공구홀더(holder)나 공구샹크(shank)에 용접하기가 쉽지 않으므로 초경합금의 기층을 사용한다. 초경합금 기층은 다이아몬드층을 기계적으로 지지하여 내충격성을 향상시키고, 공구를 제조할 때 공구홀더에 용접을 용이하게 한다.⁽⁵⁾

다이아몬드 소결체의 특성을 결정하는 중요한 요소는 다이아몬드 입자의 크기, 입자간 결합정도, 다이아몬드 입자분말의 크기, 입자간 결합정도, 다이아몬드 입자의 분포도 등 세 가지이다.

Table 1은 공구재료의 물리적 특성에 대한 비교표로서 CBN, 알루미늄 등에 비해 PCD가 가장 경도가 높고 열전도성이 가장 높은 공구재료임을 보여준다. 따라서 다결정 다이아몬드 공구가 단결정 다이아몬드 절삭공구(single crystalline diamond tool)를 교체하게 되었다.

PCD의 경도는 단결정 다이아몬드공구와 유사하고 초경합금보다 2~3배 높다. 내마모성은 단결정다이아몬드와 동등하지만 단결정다이아몬드처럼 쉽게 파쇄되지 않는다.

이것은 공구소재 내에서 수 μm 의 다이아몬드 입자들이 임의로 배열되어 있으며 입자간의 결합력이 강하므로 어느 방향에서나 다이아몬드의 경도, 내마모성, 및 기계적 강도가 균일하게 높기 때문이다. 또한 단결정 다이아몬드와 달리 파손이 생길 수 있는 벽면 평면이 없으므로, 파괴강도가 매우 높으며 모든 결정 방향에 대해 고른 마모율을 나타낸다. 또한 열전도성이 매우 우수하므로 다양한 종류의 비철금속 및 비금속재료를 황삭 또는 사상가공시 열의 방출능력이 뛰어나다.

Table 1 Physical Properties of tool materials

	Knoop hardness (kg/mm ²)	Thermal conductivity (W/(m·K))
Polycrystalline Diamond	6000	500
Polycrystalline CBN	3500	100
Alumina(Al ₂ O ₃)	1600	14~17
Ceramic(Si ₃ N ₄)	1800	15~35
sintered carbide	1500~1800	40~80
high speed steel	700~1000	40~80

2. PCD의 와이어방전가공

다이아몬드 입자들 간의 공간은 일반적으로 전기 전도체인 코발트로 채워져 있으며 이 코발트는 용매 혹은 촉매로서 PCD의 합성과정동안 PCD를 도전성으로 만들어 준다. 이것이 방전가공(EDM), 방전연삭, 와이어방전가공(WEDM)과 같은 비전통적인 가공방법에 적합하게 해준다. 그 외 Fe, Co, Ni 등 전이금속 및 Nb-Cu 같은 합금을 추가하는데 이들 합금은 HPHT하에서 다이아몬드 합성시 촉매제 혹은 용제로서 효과적으로 활용된다고 알려져 있다.

WEDM과 EDM은 일련의 불규칙하게 분포하는 불연속적인 방전을 이용하여 방전액속에 담겨진 도전성물체를 가공하는 방법으로서 최근에는 방전속도 및 면조도에 방전전류가 미치는 영향을 결정하고 매트릭스(matrix)로부터 다이아몬드 입자들을 제거시키기 위해 폭발력을 증가시켜 실험한 연구보고가 있다. PCD 공구의 성형의 가장 보편적인 방법이 다이아몬드 연삭이지만 고비용에 비효율적이다.

Fig. 4는 PCD Blank로부터 복잡한 형상의 PCD 공구를 WEDM에 의해 절단하는 방법을 보여 준다.

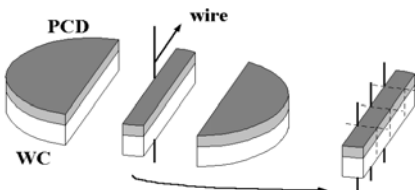


Fig. 4 WEDM of PCD Blank

WEDM은 PCD 등의 절삭공구의 성형방법으로 자리잡아 가고 있다. 왜냐하면 극초경재료(ultrahard materials)의 여유각(clearance angle)을 가져야 하는 복잡한 공구형상을 만드는 데 적합하기 때문이다. WEDM가공시 직면하는 몇가지 문제는 금속의 결정립계를 따라 일어나는 입계부식(intergranular corrosion), 가공불량(erratic cutting), 표면불량(poor surface finish), 버(burr)가 있거나 모서리불량 등이다.

PCD의 와이어방전가공에 대해, G. Spur등은 단발방전시 원통의 열원을 갖는 고체내의 열전도 모델을 기초로 공작물의 온도를 결정한 뒤 이 모델을 실제 방전과정에 적용하였다. 펄스 ON 시간이 공작물의 표면에 형성된 분화구의 반경의 크기와 표면의 흑연화된 깊이에 미치는 관계를 비교 연구 하였다.⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾

본 연구는 평균 다이아몬드 입도가 4, 10, 25 μ m인 3종류의 PCD를 작업 매뉴얼 상의 방전가공조건을 이용하여 와이어 방전가공 하였을 때 펄스폭, 방전전압 및 방전주파수(discharge frequency) 등 전기적인 변수들과 다이아몬드 입도가 방전가공속도, 표면조도, 표면특성 등에 미치는 영향을 조사하였다.

3. 와이어방전가공 이론식

와이어방전가공은 Fig.5와 같이 전극인 와이어(ϕ 0.03~0.3mm)에 장력을 준 상태에서 와이어를 이송시키면 공작물 (양극)과 전극(음극)사이에서 발생하는 방전에너지로 2차원의 윤곽형상을 가공하는 것이다.

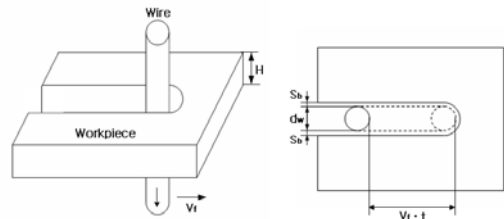


Fig. 5 The material removal by WEDM

일반적으로 공작물의 분당 제거량(Material Removal Rate(MRR_v [mm³/min]))은 식(1)과 같다.⁽⁹⁾

$$MRR_v = (d_w + 2S_b) \cdot V_f \cdot H \quad (1)$$

$$= 60 V_m \cdot f_d$$

그러므로 와이어 이송속도 $V_f[mm/min]$ 는

$$V_f = \frac{60 V_m}{H(d_w + 2s_b)} f_d \quad (2)$$

여기서 V_m 은 단발방전 당 제거량(mm^3), f_d 는 방전주파수(Hz), d_w 는 와이어의 직경(mm), S_b 는 방전갭(mm)이다.

가공속도 $V_c(mm^2/min)$ 는 식(1)의 와이어이송속도(V_f)와 공작물이 높이(H)를 곱한 값으로 다음의 식(3)과 같이 얻어진다.

$$V_c = V_f \cdot H \quad (3)$$

4. 실험방법 및 장치

4.1 실험기계

본 실험에 사용된 와이어방전가공기는 스위스 Charmilles 사의 Robofil 2030기종이며 와이어 이송 속도는 60 mm/sec, 와이어 장력은 900gf로 고정하였고 와이어 전극은 황동 코어(Cu:65, Zn:35%)에 아연도금된 직경 0.25mm의 와이어(독일 Bedra사)를 사용하였다. 방전액은 전기전도율이 15 μ S/cm인 탈이온화수(deionized water)를 사용하였다.

4.2 실험 방법

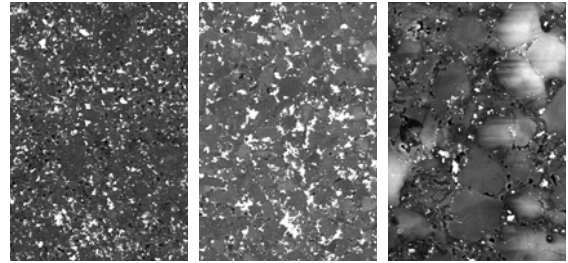
1) 실험용 시편

Fig. 6은 실험에 사용된 일진 다이아몬드사에서 제작한 PCD Blank 표면사진으로서, 평균 다이아몬드 입도가 각각 4, 10, 25 μ m인 3종류이며 그 모델은 CF, CM, CC이다. 검거나 회색부분이 다이아몬드이고, 흰색부분이 코발트이다. 입도가 클수록 입계가 선명할 것을 볼 수 있다.

2) 가공의 분류

매 실험마다 방전주파수 및 펄스폭(pulse width:

pulse ON time)를 변화시켰을 때, 방전속도 및 표면조도를 측정하였다. 또, PCD 원판의 적층 숫자가 방전속도에 미치는 영향을 파악하기 위해 동일한 황삭



(a) CF (4 μ m) (b) CM (10 μ m) (c) CC (25 μ m)

Fig. 6 SEM(1000x) surface photograph of each PCD

Table 2 Experimental conditions

WEDM M/C		Charmilles - Robofil 2030			
Wire electrode	material	zinc-coated brass wire			
	diameter	0.25 mm			
	speed	60 mm/s			
	tension	1.1 kgf			
PCD Blanks	maker	Iljin Diamond Co.			
	models	IPOL CF, CM, CC			
	grain size	CF	4 μ m		
		CM	10 μ m		
CC		25 μ m			
Test condition	voltage (V)	current (A)	pulse on time (μ s)	pulse off time (μ s)	water conductivity (μ S/cm)
	80	16	0.2	4	5
			0.4	6	10
			0.6	8	15
				10	20

5. 실험결과 및 고찰

와이어 방전가공한 후 각 시편들을 연마입자의 크기가 각각 40, 20, 10 μ m인 레진본드 휠에서 3 μ m의 다이아몬드 컴파운드를 첨가해가면서 폴리싱한 뒤 #2000의 면휠(cloth disc)과 증류수로 마무리하였다.

주사식 전자현미경(Jeol S-4200) 및 표면조도측정기

(Tallysurf-120L)를 통하여 금속표면의 조직과 표면조도 등 가공특성을 조사하였다. 표면조도는 $1.25\mu\text{m}$ 간격으로 cutoff 길이 0.8mm 를 기준으로 중심선 평균거칠기(Ra)로 나타내었다.

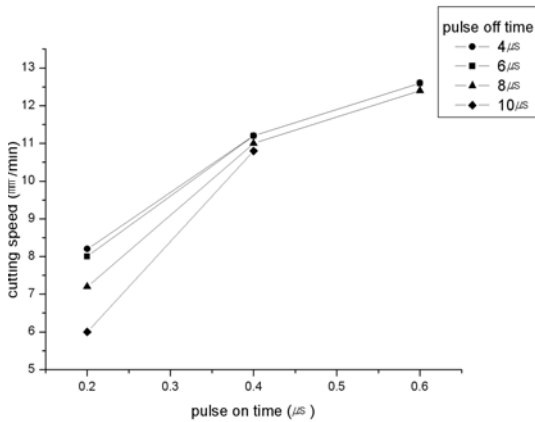


Fig. 7 Cutting speed to pulse on time, pulse off time at PCD of grain size $4\mu\text{m}$

5.1 방전가공속도 (Removal rate)

Fig. 7은 다이아몬드 입자의 크기가 $4\mu\text{m}$ 인 PCD의 방전시간과 휴지시간에 따른 가공속도를 나타낸 그래프이다. 방전시간이 증가할수록 가공속도가 증가하는 것을 알 수 있고, 휴지시간이 증가할수록 가공속도는 감소하고 있다.

방전시간이 $0.4\mu\text{s}$ 일 때는 휴지시간이 $4\mu\text{s}$ 와 $6\mu\text{s}$ 에서 동일하게 나왔는데, 이것은 휴지시간의 폭이 너무 작기 때문에 이렇게 나타난 것으로 사료되며, 휴지시간을 $25\mu\text{s}$ 으로 했을 때 가공속도가 현저히 떨어진 것을 확인했다. 방전시간이 $0.6\mu\text{s}$ 이고 휴지시간이 $10\mu\text{s}$ 일 때에는 와이어가 단선이 되어 가공속도를 측정할 수 없었다.

Fig. 8은 다이아몬드의 입자 크기가 다른 세 종류의 PCD의 방전시간에 따른 가공속도를 나타낸 그래프이다. 다이아몬드 입자의 크기가 작아질수록 가공속도는 증가하고 있다. 이것은 입자의 크기가 작아질수록 다이아몬드 입자간 코발트(cobalt)의 함유량이 많고, 코발트가 촘촘하게 다이아몬드 입자의 틈을 메우고 있기 때문에 계속적으로 방전이 발생하기 때문이다.

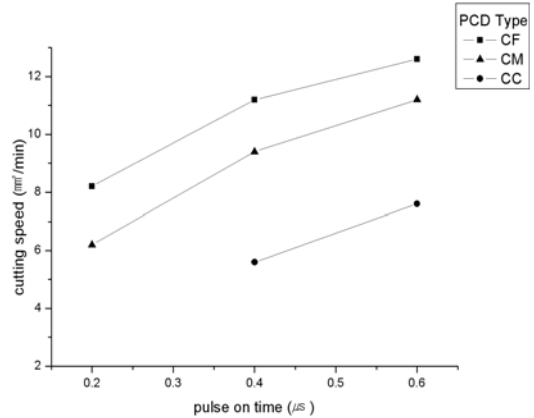


Fig. 8 Cutting speed to pulse on time and PCD type at pulse off time $4\mu\text{s}$

6.2 표면거칠기

Fig. 9는 다이아몬드 입자의 크기가 $4\mu\text{m}$ 인 PCD일 때, 방전시간과 휴지시간에 따른 표면거칠기를 나타낸 그래프이다. 방전시간이 증가할수록 표면거칠기는 더욱 거칠어지고 있으며, 휴지시간이 증가할수록 표면거칠기는 감소하고 있다.

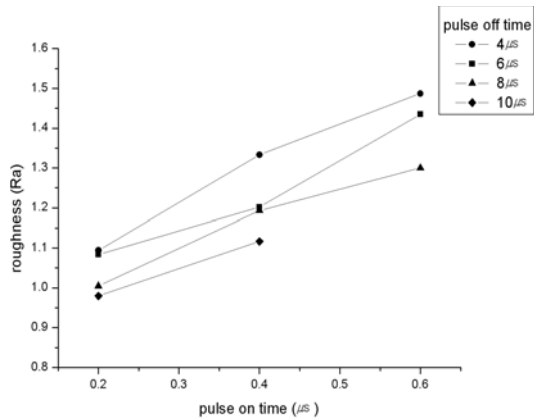


Fig. 9 Surface roughness to pulse on time and pulse off time at PCD of grain size $4\mu\text{m}$

Fig. 10은 다이아몬드의 입자 크기가 다른 세 종류의 PCD의 방전시간에 따른 표면거칠기를 나타낸 그래프이다. 다이아몬드 입자의 크기가 커질수록 표면거칠기는 증가하고 있다. 이것은 다이아몬드 입자의 크기가 직접적으로 표면거칠기에 영향을 끼치기 때

문이다. 또한 세 종류의 PCD 모두 방전시간이 증가할수록 표면거칠기는 증가하였다.

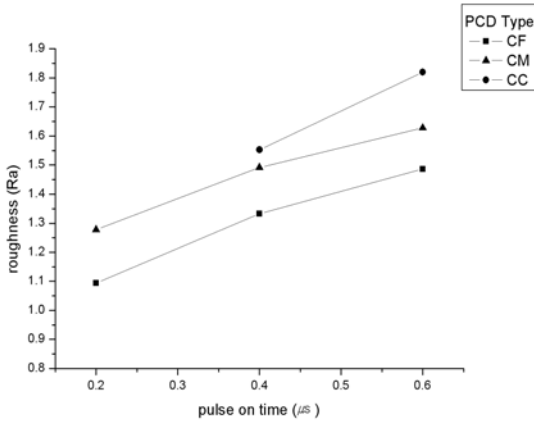


Fig. 10 Surface roughness to pulse on time, PCD type at pulse off time 4µs

Fig. 11은 방전시간이 0.4µs일 때, 다이아몬드 입자의 크기가 4µm(CF)인 PCD의 방전액의 전기전도율과 휴지시간에 따른 표면거칠기를 나타낸 그래프이다. 방전액의 전기전도율이 증가할수록 표면거칠기는 작아지고 있다. 또한 휴지시간이 증가할수록 표면거칠기는 작아지고 있다.

3) PCD원판의 적층수와 방전가공속도

PCD제작업체들은 가공능률을 향상시키기 위하여 여러 층의 원판을 적층하여 동일한 형상을 작업하고 있다.

Fig. 12는 PCD원판을 적층한 수가 방전가공속도에 미치는 영향을 보여주는 것으로 적층의 수가 2배 증가할 때 속도는 약 30%정도 감소하는 경향이 있음을 보여준다. 따라서 적층의 숫자와 방전가공속도를 감안한 최적 작업이 필요하다.

Figs. 8~12의 결과를 통하여 표면조도와 방전속도와의 상관관계를 고려하여 적절한 방전주파수를 선정해야 할 것으로 보인다.

황삭가공된 PCD의 표면거칠기를 개선하기 위하여 정삭조건으로 추가 실험이 불가능하였다. 이것은 PCD입자들을 결합하고 있던 코발트 등의 금속 결합체가 방전가공시의 높은 열에 의해 용융되어 방전액 속으로 거의 흘러 들어가고 부도체인 다이아몬드 입자만 주로 남아있어 전기가 통하지 않아서 방전이 일

어나지 않는 것으로 생각된다. 따라서 2차 이상의 정삭 방전가공은 불가능하며 연삭가공에 의해 표면조도를 향상시켜야 한다.

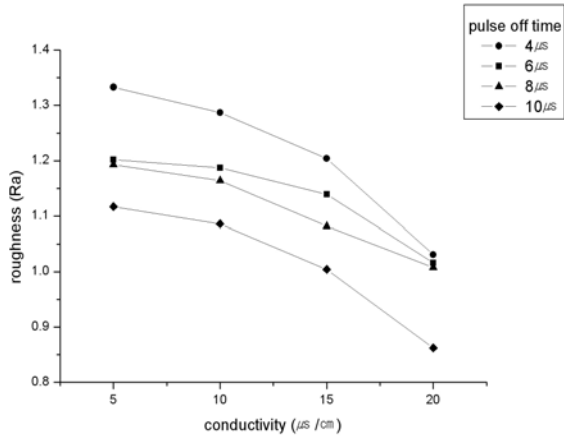


Fig. 11 Surface roughness to water conductivity, pulse off time at PCD of grain size 4µm, pulse on time 0.4µs

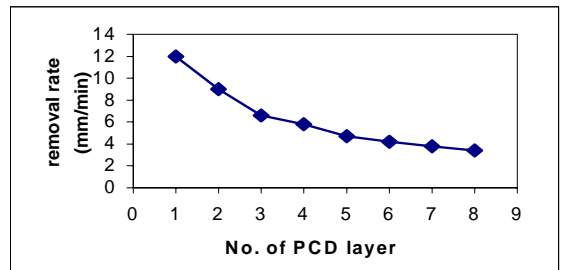


Fig. 12 Removal rate - No. of PCD blank (No-load voltage: -160V, Discharge current: 350A, Discharge frequency: 45kHz, Pulse width: 1.2µs)

5.3 표면 특성

Fig. 13은 PCD의 표면을 방전가공하기 전에 주사식전자현미경(SEM)을 이용한 미세조직 사진으로 흑/백색 부분은 코발트이고, 회색부분은 소결 다이아몬드이다.

Fig. 14는 방전가공된 표면의 SEM 사진으로 표면에 발생한 크랙들을 볼 수 있다. 이것은 방전액속에서 급열급냉의 과정을 통하여 발생한 것이다.

방전가공 중에는 공작물표면과 와이어전극 사이에 형성된 기저로부터 Co를 급속하게 유리시킨다. PCD

소결공정동안 높은 표면장력으로 다이아몬드입자들을 끌어당기고 있던 코발트가 방전에 의해 입자들 간의 장력이 해제되어 다이아몬드 입자들이 코발트로부터 자유로이 이탈하여 크랙이 생기게 된다고 생각된다.

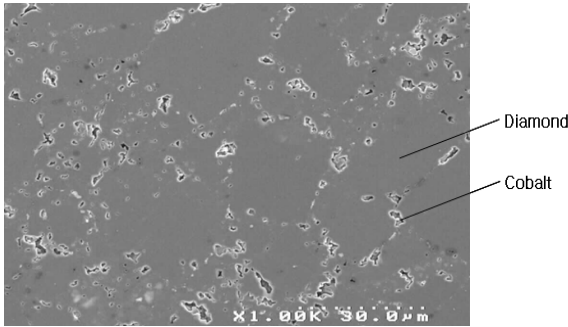


Fig. 13 Microstructure of PCD(SEM)

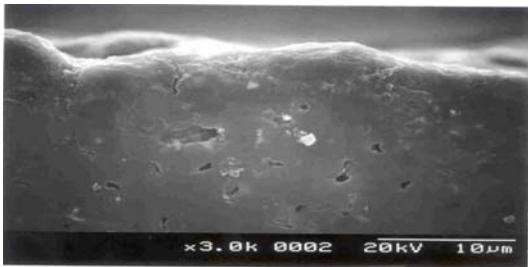


Fig. 14 WEDMed Surfaces of PCD (x2000)

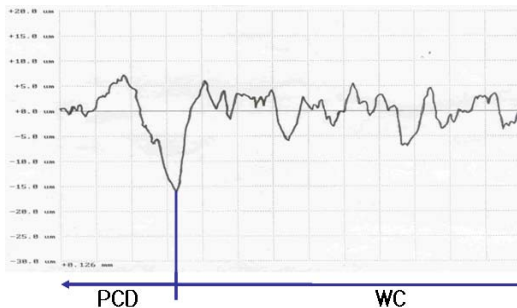


Fig. 15 WEDMed surface roughness of PCD

Fig. 15는 PCD Blank의 단면의 표면거칠기를 나타낸 것인데, PCD와 WC의 경계부분에서 거칠기가 가장 크게 나타난 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 초경이 기저인 PCD 원판소재를 황색으로 와이어 방전가공할 때 방전가공속도 및 표면조도에 방전주파수 및 방전펄스폭이 미치는 영향에 대하여 실험적으로 연구한 것으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 방전전압과 방전주파수가 클수록 대체로 방전속도는 증가하였다. 방전전류폭(pulse width)이 0.4 μ s, 방전전류가 각각 80A, 170A 일때 120~200V내에서, 방전속도가 100~130 KHz까지는 주파수에 비례하였으나 그 이상의 주파수에서는 일정하였다. 동일조건하에서 방전전류폭이 0.6 μ s 인 경우도 이와 유사한 경향을 나타내었다.

2) 방전주파수 70KHz와 100KHz 부근까지 증가할수록 표면조도가 향상되었으나 이후로는 주파수의 증가에 따라 악화하였다. 따라서 원하는 표면조도에 따라 적절하게 주파수와 펄스폭을 선정하는 것이 최적의 가공방법이 될 것이다.

3) PCD원판의 적층수가 2배 증가할 때 방전가공속도는 약 30% 감소하는 경향이 있다. 따라서, 적층수와 방전가공속도를 감안하면 가공능률을 향상시킬 수 있을 것이다.

4) 소결공정에 의해 높은 표면장력으로 다이아몬드입자들을 끌어당기고 있는 코발트가 방전되면 입자들간의 장력이 해제되어 다이아몬드 입자들이 코발트로부터 자유로이 이탈하여 크랙이 생기게 된다. 그리고 Co의 이탈에 따라 PCD의 결합력이 약화되므로 압축강도 등 기계적 성질이 떨어진다. 따라서 방전된 표면은 연마나 래핑 등에 의해 제거해야 한다.

5) 초경합금과 달리 방전작업된 표면은 PCD입자들을 결합하고 있던 Co 등의 금속 결합체가 방전가공시의 높은 열에 의해 용융되어 방전액 속으로 거의 흘러 들어가고 부도체인 다이아몬드 입자만 주로 남아있어 전기가 통하지 않아서 발생방전이 일어나지 않기 때문에 2차 이상의 정삭 방전가공은 불가능하므로 연삭가공에 의해 표면조도를 향상시켜야 한다.

후 기

본 연구는 2006학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음.(과제번호 2006AA131)

참고문헌

1. 김창호, NEW 방전가공, 기전연구소, 2004.
2. T. J. Clark, "Superabrasives and Ultrahard Tool Materials", Metal Handbook 10th. Edition, Vol. 2, pp. 1008-1018, 1990.
3. C. Fengguo, "A New Technology of High-Speed Machining Polycrystalline Diamond with Increased Electric Discharge Breakdown Explosion Force", Proc. of the 9th Int'l Symp. Electromachining (ISEM-9), pp. 309-312, 1989.
4. H. Sumiya, and S. Satoh, "Synthesis of PCD with New Non-metallic Catalyst under HPHT", Int'l I. of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 17, pp.345-350, 1999.
5. 이종찬, 유인석 공역, "초연마재를 이용한 연삭·절삭가공", 문운당, 1998.
6. M. Jennings, "Wire EDM with Natural Diamond and PCD", Diamonds in Industry, De Beers Industrial Division, pp. 3-5, 1991.
7. G. Spur, E. Uhlmann, S. Appel and N. A. Daus, "Heat Conduction Model for Wire Electrical Discharge Machining of PCD", Annals of the German Academic Society for Production Engineering, Vol. 2, pp. 39-42, 1988.
8. G. Spur, M. Puttrus and U. W. Wunsch, "Wire EDM of PCD", Industrial Diamond Review, Vol. 48, No. 529, pp.264-266, 1988.
9. J. Kozak, K. P. Rajurkar and S. Z. Wang, "Material Removal in WEDM of PCD Blank", Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, pp. 363-369, 1994.
10. 김창호 외 3인, "PCD의 W-EDM", 한국정밀공학회, 춘계학술대회논문집, pp. 885-888, 1999.
11. 김창호, J. P. Kruth, "초경합금의 와이어방전가공가공성 및 표면특성", 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 8, pp. 100-105, 1999.
12. J. Kozak, L. Dabrowski, M. Rozenek and J. Cepiak, "WEDM of Multilayer Metal Matrix Composites and Laminate Structures", Proc. of the 11th Int'l. Symp. Electromachining (ISEM-11), pp. 427-436, 1995.