

# 복합 세라믹스(TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 방전가공특성에 관한 연구

윤병주\* 김정두\*\*

## A Study on the machinability and machining properties of Composite Ceramics(TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) by EDM

Byoung-Joo Yoon\* and Jeong-Du Kim\*\*

### Abstract

TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite ceramics has high hardness, high strength, high wear and corrosion resistance. Therefore, composite ceramics have been concerned significantly with some excellent properties and many functions as new industrial materials to the industry at large. In present research, experiments are carried out to obtain the machinability and machining properties by EDM. As a result, the most suitable machining conditions of TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite ceramics was that the pulse duration is 10-60μs, the peak current is 10-16A. The machining speed and the wear of the tool electrode increased with the increase in peak current.

Keywords : E.D.M. (방전가공), Composite Ceramics (복합 세라믹스), Wear Resistance (마멸저항), Corrosion (부식), Pulse Duration (펄스시간), Peak Current (피크전류), X-Ray Diffraction (X선 회절)

### 1. 서 론

복합 세라믹스는 내열성, 내식성, 내마멸성 및 열전도성이 우수하고 열팽창율이 낮으며 고온에서 기계적 강도가 유지되는 특성으로 구조용 신소재, 금형, 내열 및 내마멸용 축, 엔진부품 등에 응용될 수 있는 대체소재로서 널리 사용되고 있다. 그러나 세라믹스는 고강도, 고경도로 인한 대표적인 난삭재로서 현재 많이 활용되는 방법으로는 다이아몬드 공구에 의한 절삭 및 연삭가공이 대

대표적인 예이다. 그러나, 이러한 가공법으로는 복잡한 형상의 경우에 많은 문제점이 있고, 이러한 제약이 세라믹스의 사용 확대에 커다란 장애 요인이 되고 있다. 최근 세라믹스의 복잡한 형상 가공을 해결하기 위한 방전가공에 대한 연구는 RB-SiC<sup>(1)</sup>, ZrB<sub>2</sub><sup>(2)</sup>계 복합 세라믹스, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiN<sup>(3)</sup>, TiB<sub>2</sub><sup>(4)</sup> 등이 있다.

본 연구에서는 복합 세라믹스(TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 방전가공하여 가공속도, 표면조도, 가공확대여유, 전극소모등을 실험하였고, 전자주사현미경과 X선 회절(X-Ray D-

\* 주성전문대학 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

iffraction) 분석을 통하여 가공표면성장, 균열등을 분석하였다.

### 2. 방전가공 이론

방전가공이란 액체속의 전극과 가공물 사이에서 발생 되는 방전에너지가 가공물 표면에 방전흔적을 만들고 또한 전극 소모를 발생시키므로, 방전가공특성은 방전 에너지의 함수로 나타낼 수 있으며,<sup>(5)(6)</sup> 일반적으로 방전 에너지는 전압전류 파형의 적분에 의해 식(1)과 같이 나타낸다.

$$J_o = \int_0^{\tau_{on}} V(t) I(t) dt \quad (1)$$

여기서,  $J_o$ : 방전에너지(J)  
 $\tau_{on}$ : 펄스시간 ( $\mu s$ )  
 $V(t)$ : 방전간극전압(V)  
 $I(t)$ : 방전전류(A)

이때 방전가공시 간극전압은 비교적 일정한 값으로 작용되고 방전전류는 피크전류( $I_p$ )가 작용되므로 식(2)와 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$J_o \propto \tau_{on} I_p \quad (2)$$

단발 방전에너지로 생기는 방전흔적이 단일펄스방전에 의한 가공량이다. 따라서, 이론적으로 방전에너지와 단일방전펄스방전에 의한 가공량  $W_0$ 와는 비례한다고 하면 다음식으로 표현된다.

$$J_o \propto W_0 \quad (3)$$

(2)식을 이용하여 정리하면 방전가공량  $W_0$  다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_0 \propto W_0 = K \tau_{on} I_p \quad (4)$$

$W_0$ : 이론적 추정 단일펄스 방전에 의한 가공량  
 $I_p$ : 피크전류 (A)  
 $e_0$ : 전극소모량 ( $mm^3/pulse$ )  
 $K$ : 상수

가공량은 이론적으로 이상과 같이 표현되지만, 방전은 항상 평면에서만 발생하는 것이 아니라 요철부에서 가공되므로 약간의 오차는 발생하게 된다. 그러나, 방전가공량의 중요한 변수는 피크전류와 펄스시간에 의존됨을 알 수 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

Fig.1은 시험편인 복합 세라믹스(TiC -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 제조공정을 나타낸 것으로물리적 및 기계적 특성은 Table. 1과 같다.

Table.1 Specifications of the test specimen.

Density	4.6 g/cm <sup>3</sup>	
Hardness (HV)	2100 kg/mm <sup>2</sup>	
Fracture Toughness	4.4 MN/m <sup>3/2</sup>	
Thermal Expansion Coefficient	25-300°C	4.7x10 <sup>-6</sup> /°C
	25-500°C	6.0x10 <sup>-6</sup> /°C
	25-800°C	7.0x10 <sup>-6</sup> /°C
Electrical Resistivity	0.26 Ωcm	
Composition Ratio (wt%)	TiC	72
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.4
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19
	Mo	0.1
	Ni	0.3

방전액은 케로신(Kerosene)을 사용하였고, 가공분진을 양호하게 제거할 수 있도록 가공액 분출노즐을 적절히 설치하였으며, 가공깊이는 0.5mm로 설정하였다. 실험단계는 1차와 2차로 구분하여 실시하였다.

제1차실험에서는 각 조건에 따른 방전 가공성을 분석하기 위하여 펄스시간( $\tau_{on}$ ) 10-250  $\mu s$ , 펄스휴지시간( $\tau_{off}$ ) 8-130 $\mu s$ 의 범위에서 피크전류( $I_p$ )를 7A로 고정시키고 63회의 가공조건으로 실험하였다.

제2차실험에서는 방전가공 특성조사를 하기 위하여 1차 실험에서 조사된 가공상태가 양호한 조건으로 실험하였고, 가공속도, 표면조도, 가공확대여유, 전극소모비등을 조사하였다. 펄스시간( $\tau_{on}$ )의 변화에 따른 가공 표면상태를 관찰하기 위하여 피크전류( $I_p$ )를 16A로 고정하고 펄스시간( $\tau_{on}$ )을 10  $\mu s$ , 60  $\mu s$ , 120  $\mu s$ , 250  $\mu s$ 로 변화시키면서 방전 실험을 하였다. 또한, 피크전류( $I_p$ )의 변화에 따른 가공표면 상태는 펄스시간( $\tau_{on}$ )을 10  $\mu s$ 로

고정시키고 피크전류( $I_p$ )를 7A, 10A, 16A, 25A로 변화시켜 가공한 표면을 전자주사현미경사진으로 비교분

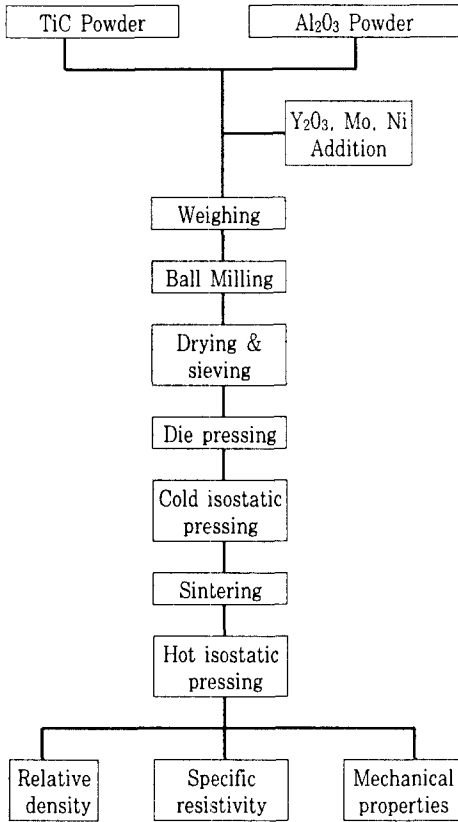


Fig.1 Flow chart for the production of a test specimen

석 하였다. 방전 가공 후에 시편 표면의 원소 이동상태와 전극표면의 원소이동 상태는 X선회절로 분석 조사하였다. 이때의 강도 측정조건은 가속전압 30KV, 전류 80mA로 수행하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### (1) TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합 세라믹스의 가공성

복합세라믹스의 펄스시간과 펄스휴지시간에 따른 방전 가공성의 실험결과는 Table.2에 나타나 있으며, Table.3은 펄스시간과 펄스휴지시간에 따른 실험 결과를 토대로 방전 가공성이 양호한 조건을 선정하여, 표면 조도, 가공확대여유, 전극소모등의 방전 가공실험을 한

결과를 나타내고 있다.

Table.2 Machinability of TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with various  $\tau_{on} / \tau_{off}$ 's

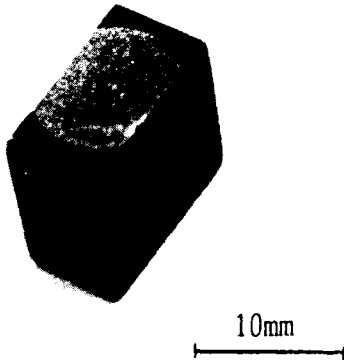
$\tau_{on}$ / $\tau_{off}$		$\tau_{on}$ / $\tau_{off}$		$\tau_{on}$ / $\tau_{off}$		$\tau_{on}$ / $\tau_{off}$	
$\mu$ s	$\mu$ s	$\mu$ s	$\mu$ s	$\mu$ s	$\mu$ s	$\mu$ s	$\mu$ s
10 8	×	60 10	△	120 15	×	250 15	×
10 15	△	60 19	△	120 30	△	250 30	×
10 22	×	60 28	×	120 45	×	250 45	×
10 31	◇	60 37	△	120 55	△	250 55	△
10 36	×	60 46	×	120 70	×	250 70	×
10 45	×	60 54	×	120 85	×	250 90	×
10 54	×	60 66	×	120 105	×	250 100	×
10 62	◇	60 77	◇	120 110	△	250 120	△
10 72	×	60 85	◇	120 130	×	250 130	×
30 8	×	100 10	×	160 15	×		
30 15	△	100 20	×	160 30	△		
30 22	×	100 30	×	160 45	×		
30 31	×	100 36	×	160 55	△		
30 36	×	100 45	×	160 70	×		
30 43	×	100 55	×	160 85	×		
30 55	×	100 70	×	160 100	×		
30 59	△	100 75	△	160 120	×		
30 70	×	100 90	×	160 130	×		

◇ Good    △ No good    × Impossible

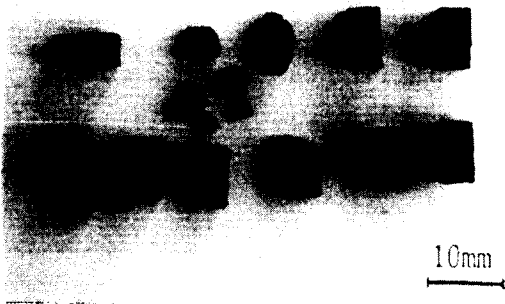
Table.3 Machining characteristics in the main experiments

Condition			Machining Speed	Surface Roughness	Clearance	Electrode Wear Rate
$\tau_{on}$ ( $\mu$ s)	$\tau_{off}$ ( $\mu$ s)	$I_p$ (A)	mm <sup>3</sup> /min	$R_{max}$ ( $\mu$ m)	$\mu$ m	%
10	31	7	0.95	14.1	50	5
10	31	10	1.90	13.2	45	11
10	31	16	2.80	14.0	30	24
10	31	25	11.70	16.0	65	88
10	62	7	0.48	13.2	35	10
10	62	10	0.85	12.6	25	25
10	62	16	2.17	10.2	30	30
10	62	25	6.09	13.0	50	80
60	77	7	0.25	15.2	70	18
60	77	10	2.21	14.2	60	54
60	77	16	3.10	13.2	55	83
60	77	25	10.87	17.0	100	188
60	85	7	0.22	17.0	85	12
60	85	10	2.61	16.0	75	46
60	85	16	3.50	18.0	90	80
60	85	25	14.70	24.0	140	175

방전가공에서 가공재료의 전기 전도도 ( $\sigma$ )는 방전 가공성에 큰 영향을 미치게 되며, 전기 전도도는 전기 비저항(specific resistivity:  $\rho$ )의 측정으로 알 수 있는데, 이때의 전도도는  $\sigma = 1/\rho$  으로 표현된다. 본 실험에 사용된 복합 세라믹스(TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 전기 비저항은 10<sup>14</sup>Ω cm, TiC의 전기 비저항은 50 μΩcm 정도이며, 전도도가 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>(7)(8)(9)</sup> 제 1차 실험에서 4가지 조건에서 양호한 상태로 나타났으며, 가공된 재료의 형상은 Fig.2(a)와 같다. 아크 방전 상태가 부드럽고 안정된 방전이 진행되었으며, 가공후의 재료표면도 크랙이나 파단 됨이 없는 것으로 관찰



(a) stable condition



(b) unstable condition.  
(broken test specimen)

Fig. 2 Photograph of Test Specimen

되었다. 반면에 가공 불안정 현상은 14가지 조건에서 발견할 수 있었는데, 이때 발생하는 이상 현상은 강한 방전에너지에 의해 생기는 스파크현상이 뚜렷이 나타났으며 이로 인해 과도한 소성파괴 현상이 발생하여 재료가 파단된 것으로 여겨진다. 이때 파단된 재료의 형상은 Fig.2(b)에 나타나 있다. 이와 같은 방전가공의 불안정 현상은 주로 부적당한 가공조건에서 발생하는 이상 현상으로 일반적으로  $\tau_{on}$  값이  $\tau_{off}$  값에 비해 너무 클 경우,  $\tau_{off}$  값이 너무 작을 경우,  $I_p$  값이 너무 클 경우 등에 많이 나타난다. 특히 세라믹스의 방전 가공시에는 재료의 특이성, 즉, 경도가 높고 취성이 일반금속에 비해 강하며 전기 전도도가 떨어지므로, 방전에너지가 너무 약하게 작용할 경우에는 방전 가공성이 불량하여지고, 그에 반하여 방전 에너지가 너무 강하게 작용할 경우에는 과도한 소성 파괴를 유발시켜 재료의 내부 및 표면에 균열이 발생하고 파단되는 것으로 사료된다.

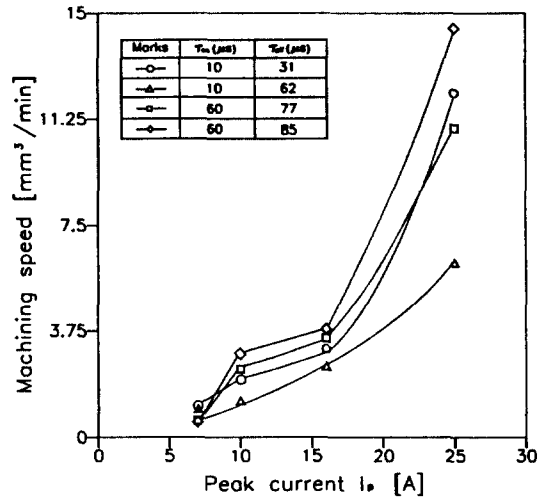


Fig. 3 Relation between peak current and machining speed

## (2) 방전가공 특성

Fig.3은 피크전류( $I_p$ )와 가공속도의 관계를 나타내고 있으며, Fig.4는 피크전류와 전극소모비의 관계를 나타내고 있다. 두 그림에서 나타난 바와 같이 피크전류의 증가에 따라 가공속도와 전극소모비의 값이 증가하는 경향을 알 수 있다. 이는 앞의 식(2)의 관계에서 피크전

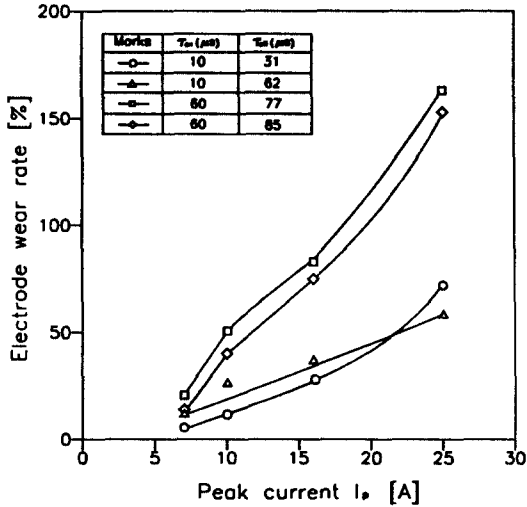


Fig. 4 Relation between peak current and electrode wear rate

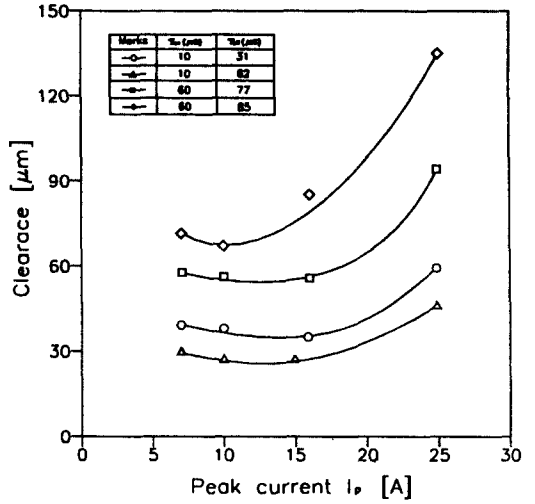


Fig. 6 Relation between peak current and clearance

류의 증가는 방전 에너지의 증가요인이 되므로, 따라서 재료의 침식작용과 전극의 소모현상을 가속화시키는 것으로 판단되어 진다.

Fig. 5는 피크전류와 표면조도의 관계를 나타내며, Fig. 6은 피크전류와 가공확대여유와의 관계를 나타내고

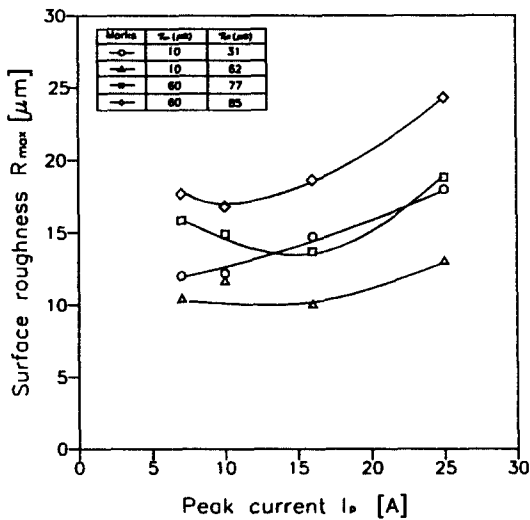


Fig. 5 Relation between peak current and surface roughness

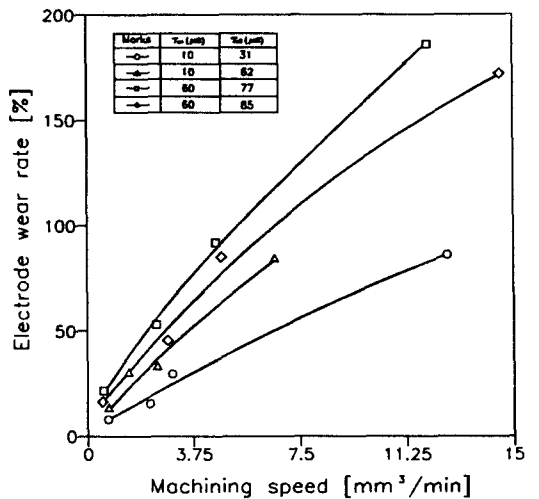


Fig. 7 Relation between machining speed and electrode wear rate

있다. 두 그림을 비교해 보면 표면조도와 가공확대여유는 피크전류의 증가에 따라 유사하게 변화하는 경향을 나타내고 있다. 가공확대여유는 방전시에 공작물의 용융 증발부가 기계적인 압력으로 비산하여 확대되는 간극을 나타내는데 이런 상태는 표면조도와 거의 같은 특성 관계를 갖게 된다.

Fig.7은 가공속도가 증가함에 따라서 전극소모도 증가하는 경향을 보여준다. 이는 전술한 바와 같이 가공속도 및 전극소모가 방전 에너지의 영향이 미치는 특성이 다.

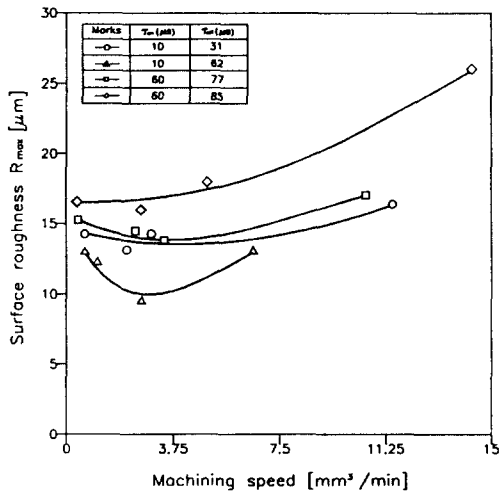


Fig. 8 Relation between machining speed and surface roughness

Fig.8에서는 가공속도의 상승에 따라 변화되는 표면조도값을 나타내고 있다. 여기에서 알 수 있듯이 가공속도가 대략 2 mm<sup>3</sup>/min 정도까지는 표면조도가 개선되고 있다가 대략 4 mm<sup>3</sup>/min 부터는 거칠어지기 시작하는 경향을 볼 수 있다. 물론 가공재료와 전극재료에 따라, 또는 가공조건에 따라 가공속도의 값은 달라질 수 있으나, 본 실험에 사용된 복합 세라믹스(TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 다듬질 방전가공 속도는 2 ~4 mm<sup>3</sup>/min 정도가 가장 적당하다고 사료된다.

(3) 가공 표면상태

Fig.9는 펄스시간( $\tau_{on}$ )을 10  $\mu$ s로 고정시키고, 피

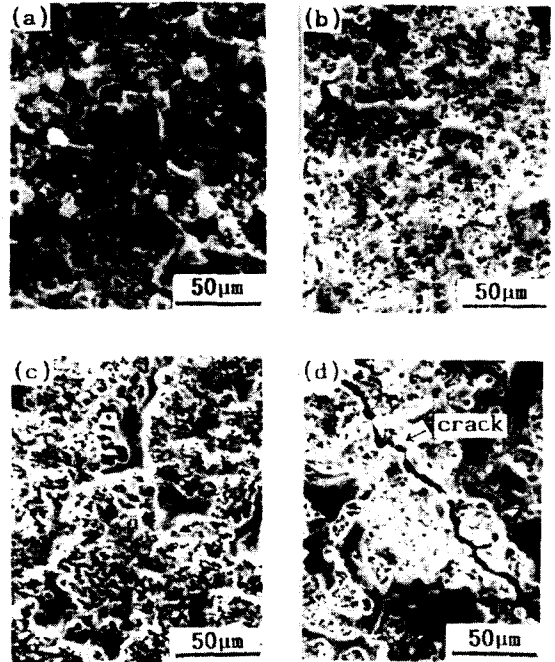


Fig. 9 SEM micrographs of EDM surface with various peak currents

(a)  $I_p=7A$  (b)  $I_p=10A$  (c)  $I_p=16A$   
(d)  $I_p=25A$

크전류( $I_p$ )를 변화시켜 가공한 표면상태를 나타내고 있으며, Fig.10은 피크전류( $I_p$ )를 16A로 고정시키고 펄스시간( $\tau_{on}$ )을 변화시켜 가공한 표면상태를 전자주사현미경으로 관찰한 것을 나타내고 있다. 이때 크랙이 없는 비교적 양호한 표면은 Fig.9에서의 (a), (b), (c)와 Fig.10의 (a), (b)에서 발견할 수 있고, 미량 또는 다량의 크랙은 Fig.9의 (d)와 Fig.10의 (c), (d)에서 발견되고 있다. 이것은 펄스시간( $\tau_{on}$ )과 피크전류( $I_p$ )의 변화로 증가된 방전 에너지가 강한 소성파괴를 발생시켜 생기는 크랙으로 여겨진다. 이와 같은 가정은 Manami<sup>(2)</sup>가 ZrB<sub>2</sub> 복합세라믹스의 가공표면 분석에서 방전가공은 용해, 비산 및 소성파괴의 복합 제거에 의해 진행된다고 언급하고 있다. 이상의 결과로써, 본 실험에 사용된 복합 세라믹스(TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 방전가공에서는 피크전류( $I_p$ ) 25A 이하 또는 펄스시간( $\tau_{on}$ ) 120 $\mu$ s 이하에서의 가공조건을

설정하는 것이 내부 크랙이 없는 양호한 표면을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

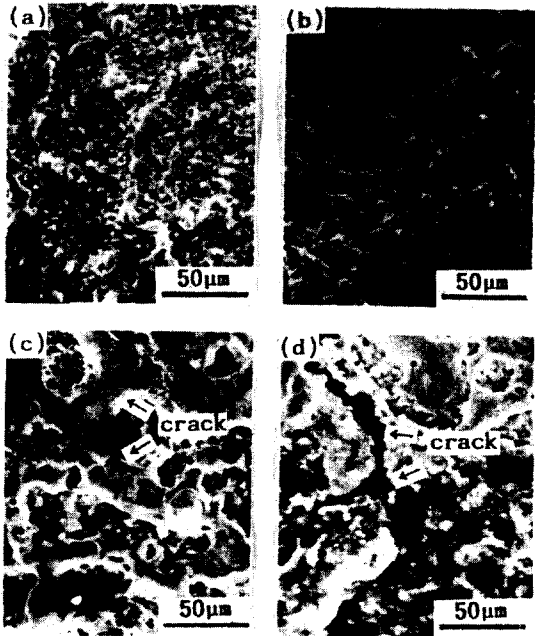


Fig.10 SEM micrographs of EDM surface with various pulse durations

- (a)  $\tau_{on} = 10 \mu s$     (b)  $\tau_{on} = 60 \mu s$
- (c)  $\tau_{on} = 120 \mu s$     (d)  $\tau_{on} = 250 \mu s$

Fig.11은 시험편의 가공전 표면과 가공후 표면을 X-Ray 회절분석한 결과로, 가공전 표면 (a)에서는 주 성분인 TiC와  $Al_2O_3$  성분이 검출되었고, 가공후 표면 (b)에서는  $Al_2O_3$  성분이 가공전과 다른 양상으로 검출된 것을 볼 수 있다. 이는 방전 에너지에 의해  $Al_2O_3$  성분이 TiC와 반응되어 비산 및 소성파괴로 가공된 것으로 나타나고 있으며, 가공표면 (c)에서는 불안정한 방전 상태에서 가공되어 크랙이 생겼고, 전극성분인 동(Cu)이 검출되었다. 이는 강한 방전 에너지에 의해 재료의 내부 및 표면에 크랙을 발생시켰고, 이에 따라 전극소모량이 많아짐으로써, 그중 일부의 용해된 동 성분이 재료 표면으로 이동하여 부착된 것이다.

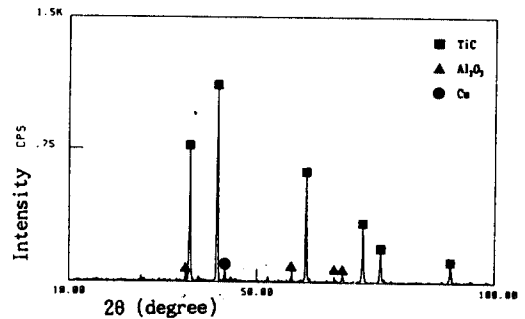
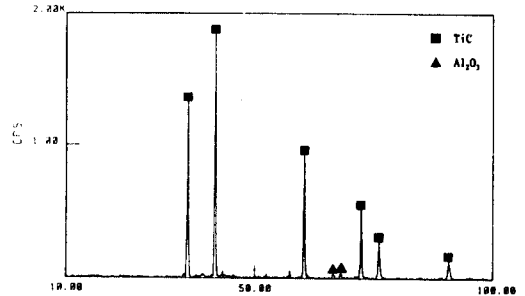
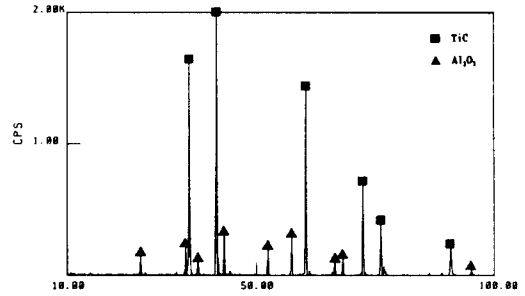


Fig. 11 X-Ray diffraction pattern of specimens  
 (a) before machining  
 (b) after machining in stable condition  
 (c) after machining in unstable condition

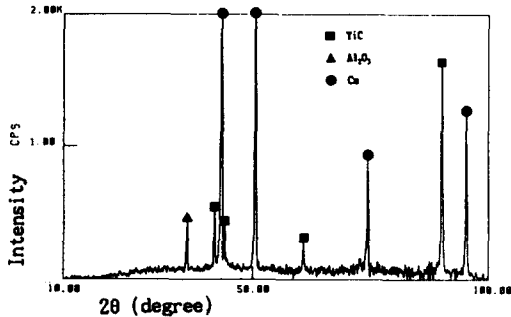


Fig. 12 X-Ray diffraction pattern of copper tool electrode after machining

Fig.12는 방전가공 후의 동 전극 표면을 회절분석한 것으로 TiC성분과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>성분이 검출되었다. 이것은 방전현상에 의해 TiC성분과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>성분이 전극표면으로 이동하여 부착된 것이며, 이렇게 부착된 세라믹스 원소의 층은 방전 가공시에 보호층의 역할을 하여 전극소모를 다소 감소시키는 결과이다.

### 5. 결 론

복합세라믹스(TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 방전가공성 및 가공특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 복합세라믹스의 방전가공에서 펄스시간( $\tau_{on}$ )10-60 $\mu$ s, 피크전류( $I_p$ ) 10-16A의 조건에서 비교적 양호한 가공 현상이 나타났다.
- (2) 피크전류( $I_p$ ) 25A의 조건에서는 그 이하의 피크 전류에 비해 약 3-5배의 빠른 가공속도를 나타내고 있으나, 재료표면에서는 미량 또는 다량의 크랙이 나타났다.

- (3) 펄스시간( $\tau_{on}$ ) 120  $\mu$ s이상에서는 다량의 크랙이 발견되었으며, 재료가 파단되는 경우도 발생되었다.
- (4) 표면조도는 방전가공 속도 2 ~4 mm<sup>3</sup>/min 범위에서 가장 양호한 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

- [1] Namura, Kubo, and Hirai, 1984, "EDM of RB-SiC" 日本窯業協會, 92{11}, pp.648-653
- [2] Manami, Sakai, and Okumiya, 1986, "EDM of ZrB<sub>2</sub>-Based composite ceramics", 日本窯業協會, Vol.94, pp.204-213
- [3] C. Martin, B. Cales, P. Vivier, and P. Mathev, 1989, "Electrical discharge machinable ceramic composites" Material Science and Engineering, Vol.109, pp.351-356
- [4] Nancy F Petrofes, and Ahmed M Gadalla, 1988, "EDM of advanced ceramics" Am Ceram. Soc. Bull, Vol.67, pp.1048-1052
- [5] 井上潔, 1974, "放電加工の基礎", 未踏加工技術協會
- [6] 電氣加工學會, 1972, "放電加工の理論と技術", 養賢堂
- [7] Mel. M. Schwarz, 1985, "Engineering applications of ceramic materials" American Society for Metals
- [8] R. J. Brook, 1988, "Ceramic material research", Material Science and Engineering, Vol.109
- [9] R. B. Wahi, and B. Ilschner, 1980, "Fracture behaviour of composites based on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC", J. of Material Science, pp.875-885