

탄화티탄/알루미나 세라믹 복합체의 방전가공

왕 덕 현*, 우 정 윤**, 윤 존 도***, 안 영 철****

Electrical Discharge Machining of TiC/Al₂O₃ Ceramic Composite

D. H. Wang*, J. Y. Woo**, J. D. Yun***, Y. C. Ahn****

ABSTRACT

Die sinking electrical discharge machining(EDM) was conducted for ceramic composite of 33 weight per cent TiC based on Al₂O₃ ceramic matrix according to the change of current and duty factor(DF). Material removal rate(MRR) was increased as the current and the duty factor increased, but better surface morphology was obtained in the region of lower current and duty factor. From the scanning electron microscopy(SEM) photographs and the energy dispersive X-ray spectroscopy(EDX) of the EDMed surface, EDM trace formed by one discharge spark was analyzed. Although the bending strength after EDM was highly decreased, reliability obtained by weibull analysis was increased twice. The bending strength was recovered or more by barrel polishing after EDM. From the FEM analysis of temperature for one spark, the possible melting region of Al₂O₃ and TiC was obtained.

Key Words: EDM(방전가공), CMC(세라믹 복합체), DF(듀티팩터), R_{max} (최대표면거칠기), MRR(공작물제거속도), SEM(주사전자현미경), FEM(유한요소법), EDX(엑스선분석기)

1. 서 론

기존의 구조용 재료로는 기능성의 한계에 부딪혀 선진국에서는 첨단 신소재 개발에 집중 투자하여 우수한 고온 강도, 높은 탄성계수, 내식성, 내마멸성 등의 성질을 가진 복합재료가 실용화 단계에 있다. 그중 세라믹 복합체는 미국, 일본, 및 유럽 등 선진국에서 자동차 및 항공기의 필수 부품으로 실용화되고 있고, 국내에서는 학계 및 연구소를 중심으로 연구가 진행되고 있으나, 산업 전 분야

에 실용화되기에는 높은 취성에 의한 가공 등의 어려움이 많아 새로운 가공기술을 필요로 한다. 세라믹 복합체는 선삭, 밀링 등의 가공방식으로는 고정밀도와 복잡한 형태의 가공이 어려운 실정이며, 특수가공방식인 레이저가공, 초음파가공, 방전가공 등이 가능성이 있는 가공방식이며, 그중 방전가공은 취성이 높아 가공이 불가능한 소재가 전기전도성이 있으면 복잡한 형상의 홈가공을 하는데 가장 적합한 방법이다⁽¹⁾.

세라믹 복합체에 관한 연구로 Petrofes⁽²⁾는 방전가공

* 경남대학교 기계공학부
 ** 경남대학교 대학원 기계공학과
 *** 경남대학교 무기재료공학과
 **** 경남대학교 화학공학과

후 가공성 평가로 표면거칠기를 측정하였는데, 가공속도가 증가할수록 크레이터의 체적이 크고 표면거칠기는 나빠진다는 것을 알았다. Ramulu^(3,4) 등은 가공속도가 빠른 조건에서 표면에 미세한 파손이 일어난다고 하였으며, 방전가공 방법으로 세라믹 복합체인 TiB₂/SiC의 가공성의 특성 연구를 시도하였다. Mohri⁽⁵⁾는 탄소강, 알루미늄을 피삭재로, 구리, 알루미늄, 텅스텐 카바이드, 티타늄 등을 소결시킨 복합재료 전극봉을 이용한 방전가공에 의한 피삭재 표면변형에 대해 연구하였으며, 작은 크랙, 높은 부식저항과 마멸저항을 확인하였다. 방전가공에 대한 Madhu⁽⁶⁾ 등은 열전도이론을 이용하여 방전시간에 따른 용융층 깊이와의 관계를 연구하였다. Mukoyama⁽⁷⁾ 원판 열원으로서 또한 Dharmadhikari 등⁽⁸⁾은 점열원으로서 방전가공 현상을 이론적으로 해석하였다.

본 연구에서는 도전성이 있는 세라믹 복합체인 TiC/Al₂O₃에 대하여 가공조건을 변화시키면서 방전가공을 실행하여 공작물제거속도와 최대표면거칠기들의 특성을 파악하여 방전가공 가능영역을 제시하고자 하며, 유한요소법에 의한 세라믹 복합체의 단일방전시 온도분포 해석을 하여 그 특성을 파악하고자 한다. 또한 굽힘응력시험을 행하여 소재의 꺾임강도를 평가하고 주사전자현미경에 의한 미세구조 변화 평가로 방전가공 메카니즘을 규명하고자 한다.

2. 방전가공의 원리

다이싱킹 방전가공은 전극봉과 피삭재 사이에 스파크방전을 발생시켜 그 열로 국부적으로 피삭재를 가공하는 방법이며, 방전이 발생하는 한 주기 동안 코로나방전에서 시작되어 불꽃방전, 아아크방전을 형성하고 절연파괴를 수반하고 이러한 과정이 연속적으로 발생한다. 방전가공시 전극봉의 극성을 양극이나 음극으로 변경할 수 있는데, 전극봉이 음극인 경우가 정극성(positive polarity)이고 그 반대인 경우가 역극성(reverse polarity)이다. Fig. 1(a)는 역극성인 경우 방전가공 현상을 나타낸 것으로 방전에 의하여 플라즈마가 형성돼 피삭재의 용융을 유발시키며 또한 방전유속에 있는 양이온과 전자가 전리되어 전극봉과 피삭재의 표면으로 이동한다.

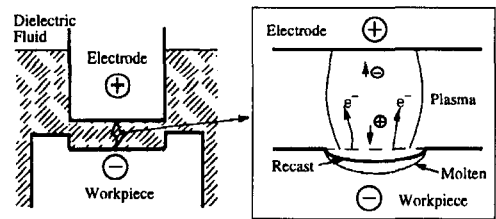
방전에 의하여 발생하는 분화구 모양의 용융층 크기는 방전에너지와 관련이 있으며, 방전에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{1}{2} V I t \quad (1)$$

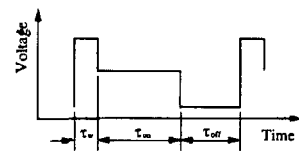
여기서 V 는 간극전압, I 는 인가전류, t 는 방전시간, 그리고 W 는 방전에너지를 나타낸다. 용융 크기에 가장 큰 영향을 미치는 것은 인가전류와 방전시간이고, 실제 방전이 진행되는 시간동안 Fig. 1(b)에 도식적으로 나타낸 것처럼 방전유도시간, 방전시간 및 휴지시간이 반복적으로 발생하며 전체시간중 실제 방전이 발생한 비율을 다음과 같이 듀티팩터(Duty factor, DF)로 나타낸다.

$$DF = \frac{\tau_{on}}{\tau_w + \tau_{on} + \tau_{off}} \quad (2)$$

여기서 τ_w 는 방전유도시간, τ_{on} 은 방전시간 및 τ_{off} '는 휴지시간을 나타낸다.



(a) Electrical discharge phenomena



(b) Discharge on/off

Fig. 1 EDM process for reverse polarity

3. 단일 방전시 열적모델 해석

Fig. 2(a)는 한 개의 방전 스파크가 피삭재에 작용하는 경우 열전도현상을 원통좌표계의 열적모델로 나타낸 것이다. 방전스파크가 피삭재에 작용하는 위치와 그 열량은 불규칙하게 변하는데 이들의 정확한 평가는 불가능하기 때문에 균일하게 분포된 열속을 갖는 하나의 원통형 스파크로 가정하였다. 단일방전에 의하여 반경 R 크기의 원형으로 피삭재에 열이 전달되며, 이 열은 피삭재가 방전유

속에서 모두 대류와 복사로 방출된다. 단일 방전이 피삭재에 작용하여 Fig. 2(a)와 같은 모델이 성립하면 다음 열방정식과 초기조건 및 경계조건을 이용하여 유한요소법으로 해석할 수 있다.

열방정식

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad \alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3)$$

초기조건

$$\begin{aligned} \text{At } t = 0 : T &= T_0; \\ \text{At } r = \infty : \frac{\partial T}{\partial r} &= 0; \\ \text{At } z = \infty : \frac{\partial T}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

경계조건

$$\begin{aligned} \text{At } r = 0 : \frac{\partial T}{\partial r} &= 0; \\ \text{At } z = 0, 0 \leq r \leq R : -k \frac{\partial T}{\partial z} &= Q(r); \\ \text{At } z = 0, R \leq r \leq \infty : -k \frac{\partial T}{\partial z} &= h(T_f - T) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, α 는 열확산계수, $Q(r)$ 은 방전불꽃에 의한 열속, k 는 열전도도, h 는 열전달계수, 그리고 T_f 는 방전유의 온도를 나타낸다.

갈러킨(Galerkin) 유한요소법을 적용하여 변분법(variational method)에 의한 한 요소에 대한 지배방정식의 약화된 형태를 유도하면 다음과 같다.

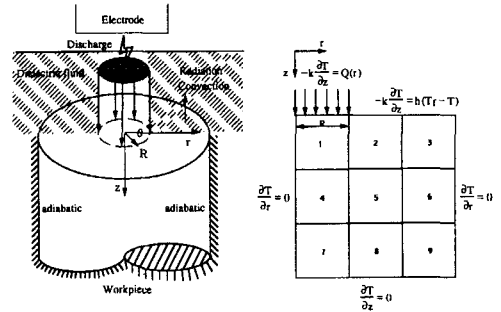
$$0 = \int_{\Omega^e} \left(\alpha \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \alpha \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) r dr dz - \int_{\Gamma^e} \varphi_i q_n ds \quad (6)$$

여기서, Ω^e 는 유한요소 영역을, Γ^e 는 경계면을 나타낸다. φ_i 는 모양함수(shape function)로서 이중선형함수이고, q_n 은 요소 경계면에 대하여 수직방향으로의 열속으로서 다음과 같이 표시된다.

$$q_n = r \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial r} n_r + \alpha \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) \quad (7)$$

변분법에 의한 방정식의 약화된 형태를 적용하기 위하여 주어진 영역을 Fig. 2(b)와 같이 유한요소로 체

(mesh) 나누기를 하였다. 12×12의 불규칙 체눈을 형성하기 위하여 소영역별로 5:4:3의 비율로 체눈 수가 분포되도록 하였으며, 각 영역에서는 등간격의 체눈이 되도록 하였다.



(a) Heat transfer model by one spark (b) Elements divide

Fig. 2 FEM model of heat transfer by one spark

속변수 T 는 유한요소 안에서 노우드점에서의 값으로부터 이중선형 내삽함수로 근사값을 구하고 최종적으로 뉴우튼-랩슨법으로 풀어 해를 구하여 전 영역에 대한 온도 분포를 얻는다.

4. 실험장치 및 방법

본 연구의 예비실험에서 도전성 세라믹 복합재료의 방전가공시 높은 온도상승에 의한 파괴가 발생하여 Fig. 3에 나타난 것처럼 피삭재를 방전유속에 완전히 잠기게 하고, 방전유를 노즐을 통하여 함침된 피삭재 표면 위로 분사시켜 칩제거 및 냉각효과를 돕게 하였다. 방전가공기는 헤드부분, 전극봉홀더, 작업탱크, 베드 및 조절판 등으로 구성되어 있는 다이싱킹 방전기 SERVOⅢ(정광기계)를 사용하였다. 본 실험은 피삭재를 척에 고정하여 방전유에 함침시켜 놓고 전극봉을 헤드부분에 설치하여 유압제어식으로 상/하방향으로 이동시키면서, 전류와 듀티팩터들의 가공조건들을 변화시켰을 경우 방전가공 특성을 파악하였다. 방전/휴지시간 동안 전압의 변화를 측정하기 위하여 가변저항기를 설치하여 오실로스코프로 전압파형을 검출하였으며, National Instruments사의 NI DAQ Board와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 전압변화 데이터를 PC에 저장하여 해석하였다.

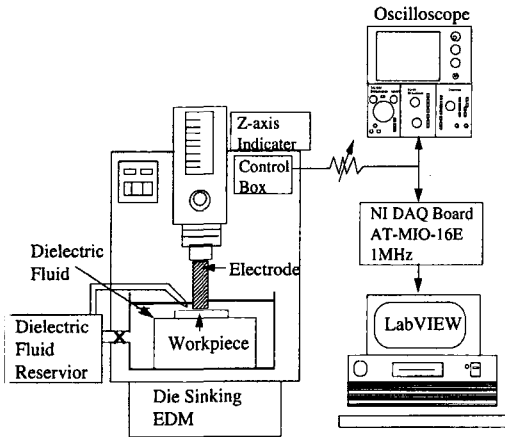


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

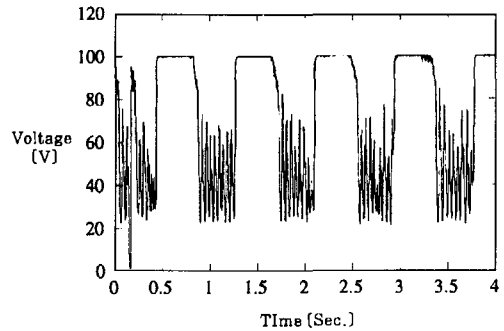
본 실험의 경우 데이터 취득장치에서 샘플링 시간을 1MHz까지 증가시킬 수 있으며, Fig. 4(a)는 샘플링 시간이 5000Hz로 헤드부가 상/하이동하는 동안 전압이 변하는 주기를 측정하였다. 칩의 유출을 돕기 위하여 헤드부가 상방향으로 이동을 하며, 하방향으로 이동시 방전이 가공조건에 따라 수십에서 수백번 진행된다. 한편 Fig. 4(b)는 샘플링 시간을 0.9MHz로 크게 하여 하방향 이동시 실제 방전이 발생하는 경우 전압변화를 측정한 결과로 Fig. 1(b)에 나타난 것처럼 방전유도시간, 방전시간 및 휴지시간으로 이루어지고 있으며, 식(2)에 의하여 방전조건에 따른 듀티팩터를 값들을 구한 결과를 Table 1에 나타내었다.

각 경우의 듀티팩터 값들은 방전유도시간, 방전시간, 휴지시간을 한 주기로 보통 3주기 이상이 포함될 수 있도록 하여 측정하고, 이들을 10회 반복 측정한 결과를 평균값으로 온/오프 단계에 따라 듀티팩터를 구하였다.

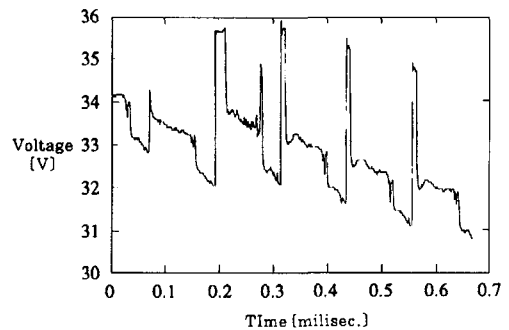
Table 1 Duty factors according to on/off stage combinations

On/off stage	τ_w (ms)	τ_{on} (ms)	τ_{off} (ms)	DF
1 / 5	0.000	0.048	0.152	0.24
3 / 5	0.007	0.059	0.129	0.30
5 / 5	0.024	0.130	0.134	0.45

방전가공을 실행한 후에 공작물의 무게를 10⁻⁴g의 전자저울을 이용하여 측정하여 실행 전 상태와 비교하여, 방전가공시 공작물제거속도(Material Removal Rate,



(a) Up/down



(b) On/off

Fig. 4 Measured discharge voltage

MRR)를 구하였다. 한편 방전가공된 면은 표면거칠기 측정장치인 Surf-test-501(Mitutoyusa)을 사용하여 동일 조건으로 반복 측정하여 중심선 평균중심선거칠기(R_a) 및 최대표면거칠기(R_{max}) 값들을 측정하여 그 평균값으로 나타내었다.

방전가공 후 표면의 주사전자현미경(SEM) 사진들과 엑스선분석기(EDX)에 의한 방전면 상태의 분석에 의하여 미세구조 해석을 하였으며, 굽힘응력시험은 KS

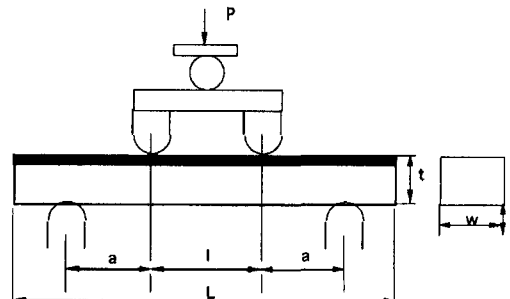


Fig. 5 Four-point bending test

L1591규격의 고기능 요업제품의 꺾임강도 시험방법에 의하여 Fig. 5에 나타난 것처럼 10개의 시편은 입도 800번의 다이아몬드숫돌로 가공하여 실행하였으며 6개의 시편은 동일한 조건으로 연삭가공을 한 후에 한쪽 면을 0.3mm 방전가공한 후에 꺾임강도 시험을 실행하였다.

본 실험에 사용된 소재는 TiC(33%)/Al₂O₃의 세라믹 복합체로, 크기가 6x10x26mm로 하였으며 그 무게가 약 6g 정도이다. 이 세라믹 소재는 온도 1750℃에서 1시간 동안 Ar분위기에서 소결하였으며, 또한 온도 1600℃, 1500kg/cm²로 30분동안 Ar분위기에서 열간정수압소결로 성형되었다. 이 소재의 성분 및 상온에서의 기계적 성질 값들은 Table 2에 나타내었다. 전극봉은 직경 20mm인 순도 99.9% 구리를 이용하여 5x12mm의 직사각형 모양으로 성형하여 실험에 사용하였고, 무게는 약100g 정도이며, 0.3mm의 깊이까지 동일한 간격으로 각각의 조건에 따라 방전가공을 실행하였다.

Table 2 Chemical composition and properties of TiC/Al₂O₃

Workpiece : TiC(33%)/ Al ₂ O ₃ (66%) Y ₂ O ₃ (1%)		
Density (Kg/cm ³)	Hardness (Hv)	Expansion coefficient (10 ⁻⁸ / °C)
4.2	2050	8.1

5. 결과 및 고찰

5.1 방전가공성 평가

전극봉이 양극이고 피삭재가 음극인 역극성인 경우, 인가전류 및 듀티팩터들의 방전조건의 변화에 따른 TiC/Al₂O₃ 세라믹복합체의 방전가공 상태를 육안 및 주사전자현미경 사진으로 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내

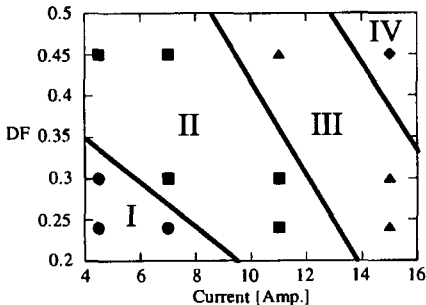


Fig. 6 EDMed surface state for reverse polarity

고 있으며, 이 그림은 TiC/Al₂O₃ 세라믹 복합체의 방전가공 가능 영역을 제시하고 있다. 방전가공조건들인 인가전류 및 듀티팩터들의 값들이 낮은 I영역에서는 양호한 표면형상(●로표기)을 나타냈으나, 조건들이 어느 정도 증가된 II영역에서는 중앙부분에 조그마한 흠집(■)들을 포함하고 있으며, 전류가 11암페어에서 15 암페어로 증가된 III영역에서는 미소한 파괴현상(▲)이 관찰되었다. 한편 III영역을 더 지나 인가전류 및 듀티팩터가 큰 IV영역 이상에서는 완전파괴(◆)가 발생하였다.

역극성시 인가전류 및 듀티팩터 가공조건들의 변화에 따라 공작물제거속도를 Fig. 7에 나타내고 있으며, 방전조건인 인가전류가 증가할수록 공작물제거속도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 한편 듀티팩터의 변화에 따른 공작물제거속도는 듀티팩터가 0.24에서 0.3으로 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내나, 0.45로 변화함에 따라 다소 증가나 감소 등의 미소 변화의 경향을 보이고 있다. 이 현상은 듀티팩터가 증가할수록 실제 방전시간은 증가하는 대신 상대적으로 휴지시간이 줄어들어 칩 방출에 필요한 충분한 시간이 없기 때문에 듀티팩터가 증가된 어느 이상에서는 큰 변화가 없는 것으로 사료된다. 한편 전류가 15암페어이고 듀티팩터가 0.45인 경우 혹은 전류가 그 이상인 경우에 TiC/Al₂O₃ 세라믹복합체의 피삭재가 높은 열에 의하여 완전 파괴가 발생하였다.

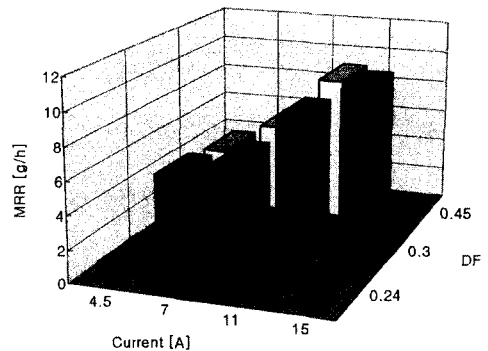


Fig. 7 Material removal rate according to current and duty factor

또한 인가전류 및 듀티팩터들의 조건들의 변화에 따른 최대표면거칠기의 경향을 Fig. 8에 나타내고 있으며, 피삭재의 중앙부근에 존재하는 미소흠집 및 미소파괴가 발생하는 경우 그 영역을 제외한 다른 영역에서 측정된 결과이다. 인가전류가 4.5암페어에서 15암페어로 변화하고, 듀티팩터가 0.24에서 0.45로 변화하는 경우 최대표

면거칠기 값은 $5\mu\text{m}$ 에서 $15\mu\text{m}$ 정도로 변화하고 있다. 이때 인가전류가 높을수록 최대표면거칠기는 나빠지는 경향을 보이고 있으며, 듀티팩터가 증가할수록 최대표면거칠기는 조금씩 더 나빠지는 경향을 나타내고 있다.

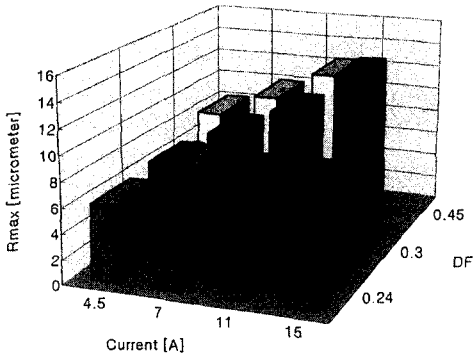
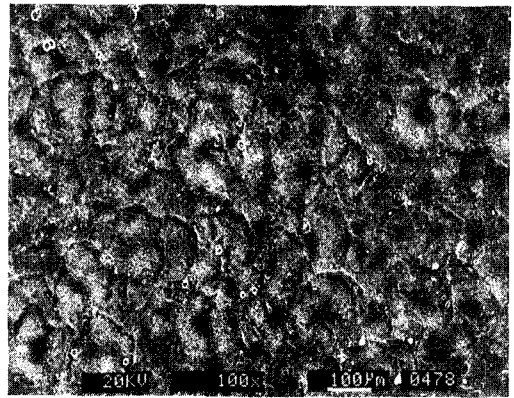


Fig. 8 Maximum surface roughness according to current and duty factor

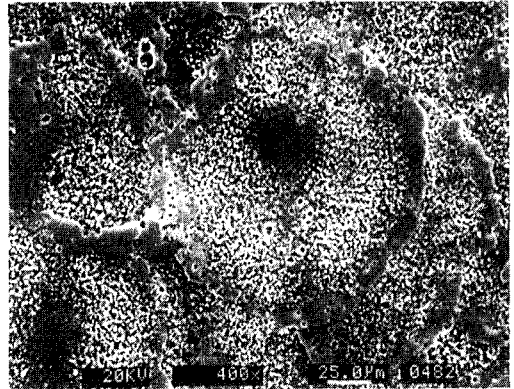
5.2 방전가공 후 미세구조분석

Fig. 9는 역극성시 전류가 4.5암페어이고 듀티팩터가 0.24인 조건에서 방전가공을 실행한 경우 피삭재 표면의 주사전자현미경(SEM) 사진들이다. Fig. 9(a)는 100배의 저배율 사진으로 방전이 여러군데 작용하고 어떠한 위치에는 그 위에 겹쳐서 떨어진 모습으로, 방전흔의 모습이 100~200 μm 정도의 분화구 형태로 분포되어 있음을 보여주고 있다. 그 중 한 개의 방전흔을 400배로 확대한 모습이 Fig. 9(b)이다. 각 방전흔들은 중심부에 40~50 μm 직경의 평평한 풀(pool)이 존재하고, 중심부를 지나 중간부에는 입자가 드러난 거친 표면부분을 보여주고 있으며, 그 주위로 10~20 μm 너비의 테두리부가 나타나고 있다. 중심부는 약간 오목하게 들어가며 평평한 모습이고 입자가 조밀하지 않게 파묻혀 있는 형상을 하고 있으며, 중간부에서는 거친 입자들 사이에 용융되었다가 재응고한 물질로 채워져 있는 것으로 나타내고 있다. 테두리부는 입자가 박혀있지 않은 균일한 모습으로 위로 약간 튀어나온 둔덕형상을 하고 있는데 방전자극의 중심쪽으로 검사가 완만하나 바깥쪽으로 급경사를 하고 있다.

분화구 모양의 방전흔을 점 엑스선 분광분석(EDX; Energy dispersive x-ray spectroscopy)에 의하여 분석한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 방전가공 전 시편의 엑스선 분광분석에서는 알루미늄이 티타늄보다 많이 검출되었다. 한편 방전가공 후 분석에 의하면 방전흔의 중



(a) EDMed surface (x100)



(b) EDMed surface (x400)

Fig. 9 SEM photographs of EDMed surface (I=4.5A, DF=0.24)

심부(A)에서는 티타늄성분 보다 알루미늄 성분이 많이 검출되었으나, 거친 중간부(B) 및 테두리부(C)에서는 알루미늄 양이 크게 줄어들고 티타늄 성분이 많이 검출되었다. 알루미늄 양이 줄어든 것은 산화 알루미늄의 용점이 낮아서 더 쉽게 용융되어 비산 및 증발하기 때문이다.

방전가공된 면의 주사전자현미경 사진들과 엑스선 분광분석의 결과들을 종합하여, 단일방전시 방전흔 생성과정을 Fig. 11에 도식적으로 나타내었다. 방전가공 현상은 방전스파크에 의하여 피삭재 표면에 높은 열이 발생하고 곧 주변의 방전유에 의하여 냉각되어진다. 분화구 모양은 Fig. 9의 주사전자현미경 사진을 단면으로 나타낸 것으로, 첫 단계는 I단계로 단일 방전에 의하여 a영역에서는 Al_2O_3 (용점 2315K) TiC (용점 3489K) 모두 용융되고, b영역에서는 TiC 는 용융되지 않고, Al_2O_3 만 용융되며,

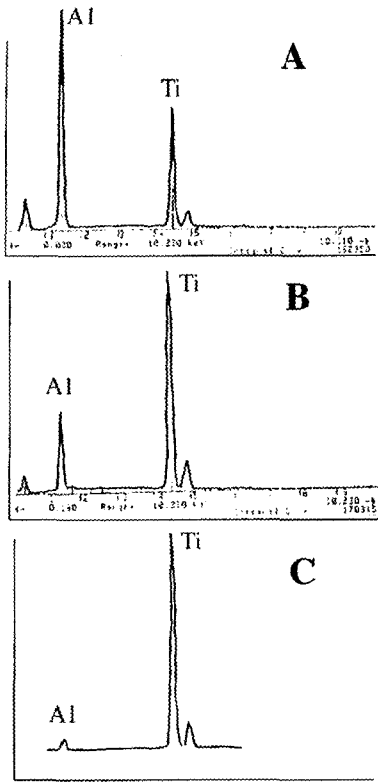


Fig. 10 EDX analysis of EDMed crater

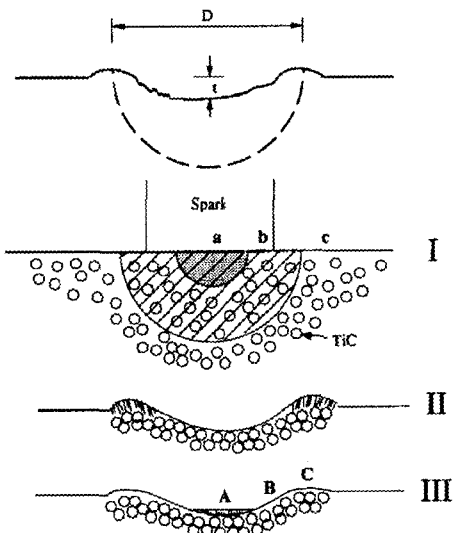


Fig. 11 Creation of discharge trace of crater shape

c영역에서는 모두 용융되지 않는 것으로 사료된다. 다음 II단계에서는 방전압에 의하여 용융되어지는 부분이 태두리부로 흩어지고, 최종 III단계로 방전유에 의하여 태두리부 둔덕부분에 용융된 성분이 재응고 과정에서 가운데로 흘러 중심부(A)에서는 Al이 많이 검출되나, 중간부(B)에서는 Ti이 상대적으로 많이 검출되고, 태두리부 둔덕부분에서도 Ti성분이 보다 많이 검출되는 것으로 생각되어진다.

방전스파크가 떨어지는 부분의 시편표면은 상온에서 갑자기 수천도 이상으로 올라가는 급열조건이 주어졌다가, 펄스형태로 주어지는 전류가 끊기면 다시 급냉조건으로 바뀌는 상황이 되므로 시편표면의 용융물은 폭발적으로 비산하게 된다. 비산한 용융물의 일부는 주변에 둔덕처럼 쌓이게 되고 온도가 가장 낮은 바깥쪽으로부터 냉각이 시작되는데, 응고점이 가장 높은 탄화티타늄부터 응고되기 시작하며 이때 산화알루미늄은 아직 액체 상태로 있고 탄화티타늄이 계속 안쪽으로 응고해 들어오게 되어, 방전자극의 태두리부에는 탄화티타늄이 주성분인 둔덕이 형성될 것이다. 그 안쪽으로는, 액상 산화알루미늄은 비산되어 상당부분 나갔지만 녹지 않은 탄화티타늄 입자들이 낮은 유동성으로 인하여 그대로 존재하게 되며, 방전자극의 중간부의 거친 부분을 형성할 것이다. 스파크가 떨어진 부분은 용융비산으로 오목한 웅덩이 모습을 할 것인데 냉각중에도 중심부의 온도가 가장 높으므로, 완전 비산하지 못한 잔류 액상 산화알루미늄은 중심부로 모여들어 이미 존재하고 있던 탄화티타늄 입자를 뒤덮으며 평평한 풀(pool)부분의 중심부를 형성할 것이다. 이러한 과정을 겪으면 중심부에 평평한 풀부분, 그 주위로 거친 입자부분의 중간부, 바깥쪽에 태두리부가 형성되는 것으로 사료된다. 이상의 결과로 TiC/Al_2O_3 세라믹 복합체의 방전가공 메카니즘은 용융증발기구로 분석된다.

5.3 굽힘응력시험

Fig. 12는 연삭가공만 실행한 경우와 연삭가공 후 한쪽면을 방전가공한 경우의 굽힘응력값들을 와이블 확률분포로 나타낸 것이다. 연삭가공만 한 경우 형상모수 m 은 4.32이고 척도모수 η 는 16.28로 나타났다. 한편 한쪽면을 방전가공한 경우 형상모수 m 은 8.88이고 척도모수 η 는 12.67로 나타났다. 연삭가공만 한 경우 척도모수가 크다는 것은 굽힘응력값이 상대적으로 크다는 것이며, 방전가공을 한 경우 형상모수가 크다는 것은 편차가 작아 신뢰성이 높다는 것이다. 연삭가공만 한 경우의 굽힘응력

의 평균값이 567MPa 정도이나, 편차가 147MPa로 평균의 30% 정도로 크게 나타났으며, 방전가공을 실행한 경우 굽힘응력의 평균값이 318MPa이고 편차가 36MPa로 10%내외로 신뢰성이 크게 나타났다.

방전가공 후 강도저하는 표면층에 발생하는 수 마이크론의 손상영역이 존재하기 때문이며 문제를 해결하는 한 방법으로 시편을 많은 분량의 연마불 속에 넣고 표면마찰을 일으켜 표면층을 수 마이크론 연마해 내는 배럴연마를 시도하였다. 시편 2개를 방전가공 후, 모떼기를 하고 배럴연마를 실시한 후 4점 꺾임강도시험을 하여, 그 결과 강도가 597MPa로 방전가공 후 저하되었던 강도값으로 복귀 또는 더 증가하는 경향을 나타내고 있다.

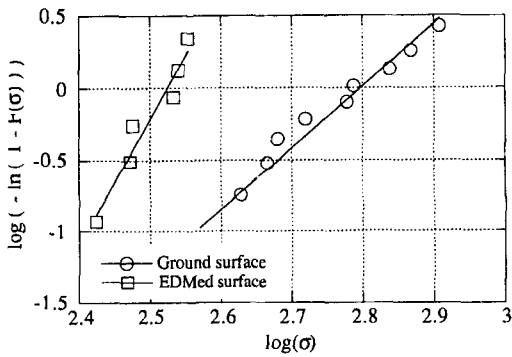


Fig. 12 Weibull distribution of four point bending strength

E.4 단일 방전시 온도구배

방전의 발생은 방전유도과정을 지나 방전발생과 방전후처가 반복하여 일어나는 비정상상태의 과정이지만 본 연구에서는 정상상태로 가정하여 해석하였다. 방전스파크의 직경은 전류와 듀티팩터의 상태에 따라 변화할 수 있으나, 본 연구에서는 Madhu 등⁽⁶⁾, Mukoyama⁽⁷⁾, Dharmadhikari 등⁽⁸⁾ 이 고려한 바와 같이 직경이 약 50 μ m 정도로 가정하였고 이보다 3배 되는 크기의 원통 밑에 단열 경계조건을 설정하여 관심영역으로 하였다. 산화알루미늄과 탄화티타늄의 물성값은 Table 3에 나타내었으며 각각의 물성값은 상온과 용점의 중간 온도에서 선택하였고 산화알루미늄-탄화티타늄 세라믹 복합체의 물성값은 혼합법칙(mixing rule)에 따라 결정하였다. 이때 세라믹 복합체의 용점은 혼합법칙에 의해 결정할 수도 있으나, 실제로는 구성성분인 알루미늄과 탄화티타늄이 각각 고유의 용점을 간직하면서 온도에 따라 독립적인 용융

현상을 보이므로 혼합법칙을 따르지 않는 것으로 보았다.

Table 3 Physical properties of ceramic composites used for FEM analysis

	Al ₂ O ₃ (1300K)	TiC (1800K)	Al ₂ O ₃ (66%) +TiC(33%)
Density, ρ [kg/m ³]	3975	4890	4237.2
Heat capacity, C_p [cal/kg·K]	303.988	204.71	268.186
Conductivity, k [cal/m·s·K]	1.434	1.11	1.31
Diffusion coefficient, α [m ² /s]	1.187·10 ⁻⁶	1.11·10 ⁻⁶	1.153·10 ⁻⁶
Melting point [K]	2315	3489	2679.27

열전달계수는 열대류와 열복사 효과가 합산된 형태로 식(8)에서 계산적으로 구하였으며, 방전가공 문제의 매개변수 범위에 대하여 열복사에 의한 열대류의 보정은 약 10% 정도인 것으로 Madhu 등⁽⁶⁾ 및 Bromley⁽⁹⁾의 문헌은 밝히고 있다. 한편 열복사에 의한 열전달의 효과는 식(9)에서 구할 수 있다.

$$h = h_c + h_r \tag{8}$$

$$h_r = \sigma_B \cdot \epsilon \cdot (T^2 + T_f^2) \cdot (T + T_f) \tag{9}$$

여기에서 σ_B 는 볼츠만 상수(Boltzman's constant)이고 ϵ 은 복사효율이다. 이에 따라 구한 열복사에 의한 열전달계수는 234.56cal/m²·s·K가 되어 이의 10배인 2345.6cal/m²·s·K를 열대류 및 열복사 효과에 의한 열전달계수로 사용하였다. 이 경우 방전열속은 3.710 × 10⁷cal/s·m²이 된다.

비정상상태 방전인 경우 방전시간이 마이크로초(μ s) 단위로 매우 짧아 방전열량 값이 커야 하지만 정상상태 방전을 가정한 경우에는 열량이 연속적으로 공급되기 때문에 그 값이 비정상상태 방전에 비해 마이크로 수준으로 작게 주어야 한다. 본 연구에서는 3.710×10⁷cal/s·m²의 방전열속을 기준으로 하였다. 이 열속은 반경 25×10⁻⁶m인 면적을 통해 공급되므로 방전열량은 3.937×10⁻⁴W가 된다. 이 경우 방전이 40V 내외의 전압차에서 일어난다고 할 때 약 1.0×10⁻⁵A의 전류를 공급하는 것에 해당하며, 곧 1초 동안에 1.0×10⁻⁵Coulomb의 전하량이 공급되는 것과 같다. 비정상상태 방전이 1 μ s 동안에 일어난다면 이와 동등한 전하량이 공급되기 위해서는 10A의 전류가 흘러야 한다는 것을 뜻한다. 실제로 비정상상태 방전에서는 5~15A의 전류가 흐르는 것으로 확인되고 있으므로, 정

상상태 방전에 대해 본 연구에서 택한 방전열속 값은 적당한 값이라고 할 수 있다.

이 방전열속 값인 $3.710 \times 10^7 \text{ cal/s} \cdot \text{m}^2$ 을 기준으로 하여 이보다 1.5배, 2배, 3배씩 열속을 증가시키면서 각 경우에 따른 피삭재 내부의 온도 분포를 살펴보았다. Fig. 13은 기준값인 $3.710 \times 10^7 \text{ cal/s} \cdot \text{m}^2$ 의 방전열속을 사용한 결과이며, 어느 정도 범위에 걸쳐서 알루미늄(용점 2315K)의 용융이 예상되지만 탄화티타늄(용점 3489K)은 아직 용융되지 않는 것으로 나타나고 있다. 방전열속을 $5.565 \times 10^7 \text{ cal/s} \cdot \text{m}^2$ 로 1.5배 높은 경우의 온도분포를 Fig. 14에 나타내었다. 여기에서는 관심영역 안의 모든 알루미늄들이 용융됨을 알 수 있으며, 탄화티타늄도 반경 $30 \mu\text{m}$, 깊이 $25 \mu\text{m}$ 에 상당하는 범위까지 녹는 것이 보인다.

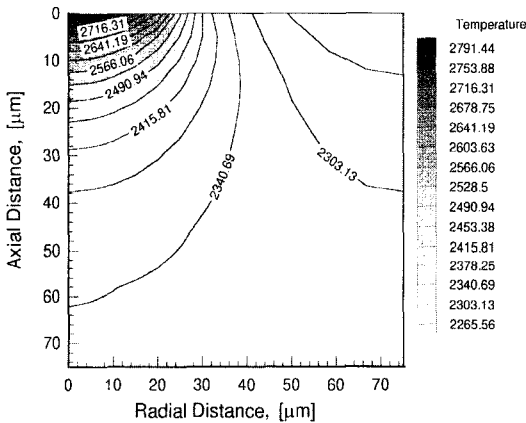


Fig. 13 Temperature distribution of EDMed surface for discharge energy of $3.710 \times 10^7 \text{ cal/s} \cdot \text{m}^2$

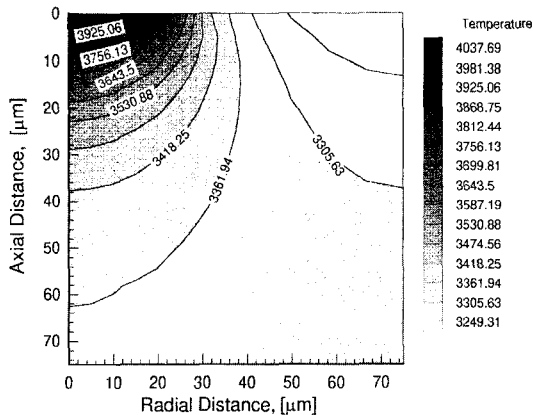


Fig. 14 Temperature distribution of EDMed surface for discharge energy of $5.565 \times 10^7 \text{ cal/s} \cdot \text{m}^2$

6. 결론

도전성 세라믹 복합체인 $\text{TiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 전극봉의 역극성에 의한 형상 방전가공 실험연구로 공작물제거속도 및 최대표면거칠기, 주사전자현미경 및 점 엑스선 분광분석을 통한 가공면의 미세조직변화, 유한요소법으로 방전흔의 분석 등을 통한 방전가공의 특성에 대한 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

방전가공 조건들인 인가전류와 듀티팩터의 변화에 따른 방전가공 가능영역을 제시하고 있으며 이들 조건들이 낮을수록 공작물제거속도는 낮으나 양호한 표면형상을 얻을 수 있었다. 양호한 표면형상의 미세구조를 분석한 결과 한 개의 방전흔의 모양이 Al성분이 많이 검출되는 평평한 풀모양의 중심부, 상대적으로 Ti성분이 많이 검출되는 입자가 거칠게 드러난 중간부, 그리고 Ti성분이 크게 나타나는 테두리부로 구성되는 것으로 나타나, 방전흔의 생성과정을 추정하였다. 이 소재에 대한 방전가공 메카니즘은 용융증발기구로 분석되었다.

방전가공 후 꺾임강도는 가공전에 비하여 큰 감소를 나타내나 와이블분포의 형상모수가 2배 이상 증가하여 방전가공 후 피삭재의 신뢰도는 대폭 향상되는 것으로 나타났다. 방전가공 후 시편을 배열연마한 경우 꺾임강도는 방전가공 전 시편보다 증가하는 것으로 나타났다.

방전열량이 연속적으로 공급되는 정상상태 방전가공으로 가정하여 유한요소 해석에 의하여 온도분포를 해석한 결과 방전열속이 1배인 $3.710 \times 10^7 \text{ cal/s} \cdot \text{m}^2$ 인 경우 어느 영역에서는 알루미늄이 성분이 용융되었으나 방전열속이 1.5배인 $5.565 \times 10^7 \text{ cal/s} \cdot \text{m}^2$ 인 경우 관심영역 안의 모든 알루미늄이 녹았으며, 탄화티타늄도 반경 $30 \mu\text{m}$, 깊이 $25 \mu\text{m}$ 에 상당하는 범위까지 용융되는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. S. Abrate and D. Walton, "Machining of Composite Materials. Part II: Non-traditional Methods," Vol. 3, No. 2, pp.85-94, 1992.
2. N. Petrofes, A. Gadalla, "Electrical Discharge Machining of Advanced Ceramics," Ceramic Bulletin, Vol. 67, No. 6, pp. 1048-1052, 1988.

3. M. Ramulu, H. W. See, and D. H. Wang, "Machining of Ceramic Composite TiB_2/SiC by Spark Erosion," *Manufacturing Review* Vol. 3, No. 2, pp. 123-129, 1990.
4. M. Ramulu, "EDM Sinkers Cutting of Ceramic Particulate Composite $SiC-TiB_2$," *Advanced Ceramic Materials*, Vol. 3, No. 4, pp. 324-327, 1988.
5. N. Mohri, N. Saito and Y. Taunekawa, "Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode", *Annals of the CIRP*, Vol. 42, pp. 219-222, 1993.
6. P. Madhu, V. K. Jain, and T. Sundararajan, "Analysis of EDM Process: A Finite Element Approach," *ASME, Computers in Engineering*, Vol. Two, pp. 121-127, 1991.
7. Y. Mukoyama, "The Mechanism of Electric-discharge Machining," *Bull. Jap. Soc. Prec. Eng.*, Vol. 2, pp. 288-295, 1968.
8. S. W. Dharmadhikari and C. S. SHarma, "Determination of Material Removal in EDM using a Multiple Heat Source Model," *IX AIMTDR Conference, IIT, Kanpur*, pp. 316-320, 1980.
9. L. A. Bromley, "Heat Transfer in Stable Film Boiling," *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 46, No. 5, pp.221-227, 1950.

부 록

A. 와이블분포에 의한 굽힘응력해석
확률밀도함수

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right\} \quad (A1)$$

여기서 m 은 형상모수(shape parameter)이고, η 는 척도모수(scale parameter)이다.

m 이 클수록 편차가 작으며, η 가 클수록 강도가 크다
누적분포함수

$$F(t) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right\} \quad (A2)$$

$$\log(-\ln(1 - F(t))) = -m \cdot \log(\eta) + m \cdot \log(t) \quad (A3)$$

$\log(-\ln(1 - F(t)))$ 와 $\log(t)$ 는 서로 직선 관계임을 알 수 있고, m 은 이직선의 기울기이다. n 개의 자료가 있을 때 이를 크기순으로 나열하고, $t_{(i)}$ 를 i 번째 순위의 자료라 하며, 자료 $t_{(i)}$ 에 대응하는 누적확률 $F(t_{(i)})$ 를 중위순위 (median rank)로 다음 식으로 계산한다.

$$F(t_{(i)}) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (A4)$$