

본 연구는 1996년도 교육부 기계공학 학술연구조성비(ME96-E-01)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

초음파 진동 부가에 의한 세라믹 복합체의 형조방전가공

왕덕현*, 우정윤**, 윤준도***

Die-sinking Electrical Discharge Machining with Ultrasonic Emission for Ceramic Matrix Composite

Duck-Hyun Wang*, Jeong-Yun Woo** and Jon-Do Yun***

ABSTRACT

Die-sinking electrical discharge machining(EDM) for conductive ceramic matrix composite(CMC) of TiC/Al₂O₃ was experienced with addition of ultrasonic emission, and the results were compared with ones obtained by the EDM only. From this experimental study, the values of material removal rate(MRR) and surface roughness(R_{max}), scanning electron microscope(SEM) micrographs, and weibull probability distribution of bending strength for the specimens were obtained and compared. The trend of MRR was found to be increased slightly with the current and the duty factor for both EDM only and EDM with ultrasonic emission. The MRR values were found to be increased for EDM with ultrasonic emission. Better surface roughness values were obtained for EDM only rather than for EDM with ultrasonic emission. The SEM micrographs of EDMed surface by under various operating conditions showed less micro cracks in various places. Although smaller bending strength value was obtained by EDMed surface with ultrasonic emission rather than by EDMed surface, but the higher reliability value was obtained for the EDM with ultrasonic emission by weibull probability distribution analysis of bending strength.

Key Words : Die-sinking EDM(형조방전가공), CMC(세라믹 복합체), DF(듀티팩터), Negative polarity(역극성), MRR(공작물제거속도), R_{max}(최대표면거칠기), SEM(주사전자현미경)

1. 서론

항공우주, 자동차, 원자력 및 전자부품산업 등 미래 지향적 산업분야에서는 고경도 내마멸성, 내열성, 기계적 및 전기적 성질들이 뛰어난 세라믹, 초내열합금 등의 신소재가 개발되어 그 사용범위가

증가되는 추세이다. 이 신소재들을 최종 마무리 제품으로 사용하기 위하여 형상가공으로, 일반가공방법으로는 불가능하여 특수가공방식인 초음파가공, 방전가공 등이 가능성이 있는 방법들이다. 난삭재의 일종인 세라믹 복합체는 순수 세라믹재료와는 달리 비록 낮은 정도이지만 도전성을 갖고 있는 침

* 경남대 기계자동화공학부

** 경남대 대학원 기계공학과

*** 경남대 신소재공학부

가상으로 복합체를 형성하면, 비록 많은 방전가공 시간이 소요되는 단점이 있으나, 방전가공이 가능하다. 예를 들어 방전가공은 소재가 전도성을 갖고 있어야 하므로, 세라믹소재에 TiC, TaC 등과 같은 분산상을 첨가하여 어느 정도의 도전성을 갖고 있도록 하면 방전가공이 가능하다.

세라믹 복합재료의 방전가공후 가공성 평가로 Petrofes^[1]는 표면거칠기를 측정하였으며, 가공속도가 증가할수록 방전사극의 체적이 크고, 표면거칠기는 나빠진다는 것을 알았다. Kremer^[2,3] 등은 초음파 진동이 진극봉 방향으로 전달될 수 있도록 Sonotrade 장치를 개발하여 연구를 하였으며, 슬러리 칩 제거가 용이하게 되어 가공성을 향상시킬 수 있었다. Koshimizu^[4]는 연삭입자가 피삭재 위에 있고, 초음파가공이 위주가 되는 가공방법에 방전을 부가한 방법의 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 알루미늄에 탄화티타늄이 첨가된 난삭재인 도전성 세라믹 복합체를 역극성으로 순도가 높은 구리를 사용하여 방전가공으로 가공조건에 따른 공작물제거속도 등의 연구를 진행하고 있는데, 특히 난삭재인 경우 가공이 어려울 뿐만 아니라 가공시 칩의 배출이 잘되지 않아 많은 가공시간이 소요되어 경제적 부담이 가중되고 있는 실정이다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 방전가공과 동일한 상태에서 초음파를 부가한 특성 연구를 수행하였다. 또한 방전가공된 면의 파단면 분석에서는 표면거칠기 상태와 가공중에 순간적으로 용융되어 재응고된 용융층 두께와의 관계를 파악할 수 있으며, 피삭재의 굽힘응력값의 와이블분포분석 등을 비교함으로써 초음파 진동이 방전가공성에 미치는 효과로써 굽힘응력값과 그 신뢰성을 제시할 수 있을 것이다.

2. 방전가공원리 및 관련이론

2.1 방전가공원리 및 이론

방전가공은 진극봉이 피삭재와 25 μ m 정도의 간극을 유지하면서 스파크 방전을 발생시켜 그 열로 국부적으로 소재를 가공하는 방법이다^[5]. 방전은 순간적으로 코로나방전에서 시작되어 불꽃방전, 아아크방전 형태로 진행되어 피삭재를 절연 파괴하는 과정으로 연속적인 방전이 일어나며, 이러한 과정 중 가열작용과 충격력의 발생으로 높은 에너지가

발생하며 주변의 방전액은 플라스마 상태로 되고, 그 열로 피삭재가 가공되는 것으로 그 원리를 Fig. 1에 나타내었다.

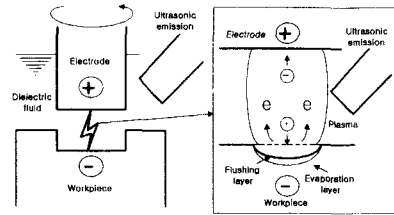


Fig. 1 Principle of electrical discharge machining

또한 열유동 및 충격파에 의한 피삭재 표면에 용융된 분화구층 등을 보여주고 있으며, 이러한 과정에서 높은 에너지와 기포가 발생하여 가공을 돕고 있다. 방전가공에 의하여 피삭재가 제거되는 정도는 방전에너지와 밀접한 관계가 있으며, 방전 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, V 는 방전가공시 간극전압이고, I 는 방전인가전류를 나타내며, t 는 전류가 흐르는 시간이다. 이러한 변수 중 공작물제거속도에 인가전류가 가장 크게 영향을 미치며, 전류가 흐르는 시간은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 실제 방전시간으로서 영향을 미치게 되는데, 이것은 방전유도시간, 방전시간 및 휴지시간의 총합 시간 중 실제 방전이 일어난 방전시간의 비율인 듀티팩터(DF)로 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서, τ_w 는 방전유도시간, τ_{on} 은 방전시간 및 τ_{off} 는 휴지시간이다. 그리고 식(1)과 식(2)의 변수들은 방전가공 실험의 중요한 가공조건으로써 사용되어지며, 또한 각각의 변수에 따른 가공성을 평가할 수 있다.

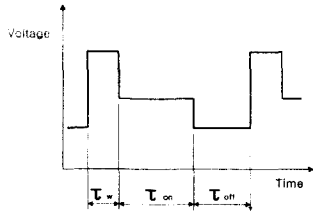


Fig. 2 Instant voltage change due to on/off time

2.2 초음파 부가에 따른 피삭재 밀면에서의 음향방출신호

음향방출(Acoustic Emission : AE)신호는 소성변형이나 파괴거동을 하는 재료로부터 자동적으로 방출되는 천이 탄성에너지를 전기적인 신호로 변환되어진다. 즉 전위이동, 쌍정변형, 입계미끄럼변형, 소성변형, 균열의 생성, 전파, 파괴 및 마찰 등이 복합적으로 발생하는 탄성파로 매우 높은 주파수영역을 갖는다. 이러한 탄성응력파는 고체의 내부구조를 통해 모든 방향으로 전파되어 나가고, 음향방출센서는 이를 감지하는 것이다. 음향방출신호의 분석방법에는 여러 가지가 있으나, 통계학적인 방법으로 음향방출신호의 RMS값(Root Mean Square value)으로서 해석을 많이 하며, 그 값을 수학적으로 나타내면 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$RMS = \left[\frac{1}{l} \int_0^l z^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

그리고 주파수 분석방법으로는 측정된 음향방출신호의 전압값을 주파수영역에서 자기상관계수(Autocorrelation)함수와 파워스펙트럼 밀도(Power spectrum density)함수를 알아내며, 그 특성을 파악할 수 있는데, 파워스펙트럼밀도함수는 식(4)와 같이 정의된다.

$$G(\omega) = \left(\frac{2}{\omega} \right) \int_0^{\infty} R(\tau) \cos(\omega \tau) d\tau \quad (4)$$

2.3 와이블분포에 의한 굽힘응력해석

세라믹 복합체 시편의 4절굽힘응력값(꺾임강도)은 불규칙적이기 때문에 와이블분포에 의하여 강도와 신뢰도를 해석할 수 있다. 굽힘응력값의 확

률밀도함수인 $f(\sigma_i)$ 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\sigma_i) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{\sigma_i}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_i}{\eta} \right)^m \right\} \quad (5)$$

여기서 σ_i 는 꺾임강도 값이고, m 은 형상모수(Shape parameter)이고, η 는 척도모수(Scale parameter)이다. 척도모수 η 가 크면 굽힘응력이 크다는 것을 나타내며, 또한 형상모수 m 이 크면 응력의 편차가 작아 신뢰성이 크다는 것을 나타낸다. 와이블분포의 누적분포함수는 식(6)처럼 표현되며, 식을 정리하고 양변에 자연로그와 상용로그를 취하면 식(7)처럼 된다.

$$F(\sigma_i) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_i}{\eta} \right)^m \right\} \quad (6)$$

$$\log(-\ln(1 - F(\sigma_i))) = -m \cdot \log(\eta) + m \cdot \log(\sigma_i) \quad (7)$$

여기서 $\log(-\ln(1 - F(\sigma_i)))$ 와 $\log(\sigma_i)$ 는 서로 직선 관계임을 알 수 있고, m 은 이직선의 기울기이다. 누적분포함수 $F(\sigma_i)$ 값을 구하는 방법은, n 개의 자료가 있을 때 이를 크기순으로 나열하고, σ_i 를 i 번째 순위의 자료라 하며 자료 σ_i 에 대응하는 누적분포함수 $F(\sigma_i)$ 를 중위순위(median rank)로 다음 식(8)처럼 계산한다.

$$F(\sigma_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (8)$$

3. 실험방법 및 실험장치

본 실험에 사용한 방진가공기는 Fig. 3에서 나타내고 있는 것처럼 형조 방진가공기(Jung Kwang SERVO III, Korea)를 사용하였고, 초음파의 진동 발생장치는 고주파의 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환하여, 기계적 진동을 방진유를 통하여 피삭재표면에 영향을 줄 수 있도록 한 것으로 발전기, 제어부, 진동자, 메인혼 및 공구혼 등으로 구성되어 있다.

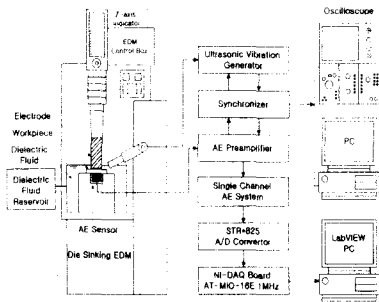


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

그리고 공구흔에서 주파수 27kHz의 용량인 초음파가 발생하는 것으로 방전유에 함침된 피삭재와 공구흔과의 각도는 30°이고, 약 10mm의 거리에서 피삭재표면에 영향을 미치도록 하였다.

초음파는 음향방출신호 시스템장치로 측정하였는데, 이 장치는 일반적으로 응력파가 자극되었을 때 기계적신호를 전기적 신호로 바꿀 수 있는 센서를 사용한 것으로, 본 실험에 사용한 음향방출 실험장치(Physical Acoustic Co., U.S.A.)는 100~300kHz에 가장 민감한 반응을 보이고 있는 Micro-100을 사용하였다.

Table 1 Experimental equipment and apparatus

Name	Model	Manufacturer
EDM	SERVO III	Jung Kwang
PC	586	Newtec(Korea)
A/D converter	AT-MIMO 16E	National Instruments
Oscilloscope	1468	Tektronix(U.S.A.)
Electronic balance	B120S	Basic
Surface roughness	Surftest-501	Mitutoyo(Japan)
SEM	ABT-32	Topcon(Japan)
AE measurement	Micro-30	Physical Acoustic Co.
Ultrasonic emission	DYW-427	Daeyoung Ultrasonic

방전가공에 초음파의 영향은 피삭재의 밀면에서 측정된 전압신호분석은 음향방출 시스템장치를 통하여 AI-DAQ board(National Instrument Co., U.S.A.)의 A/D board와 LabVIEW 프로그램(National Instrument Co., U.S.A.)을 이용하여 데이터를 PC에 저장하여 분석하였으며, 실험연구에 사

용된 장치 및 측정기기는 Table 1에 나타내었다.

한편 본 실험에 사용된 피삭재인 10x25x25mm 크기의 TiC(33%)/Al₂O₃(66%)를 방전가공으로 절단하여 크기 6x10x25mm이고, 무게 6g인 것을 사용하였다. 이 소재의 소결조건은 1750℃에서 1시간 동안 Ar분위기에서 또한 열간 정수압 소결조건은 1600℃, 1500kg/cm²로 30분 동안 Ar분위기에서 성형되었으며, 이 소재의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 2에 나타내고 있다.

Table 2 Chemical composition and properties of TiC/Al₂O₃ workpiece

Density (kg/cm ³)	Hardness (Hv)	Heat conductivity k (cal/m · s · k)	Melting point (K)
4237.2	2,050	8	2679.27

그리고 방전가공용 전극봉은 직경 20mm로 Table 3에 나타낸 조성과 성질을 가진 순도 99.9%의 구리를 5x12x15mm 크기의 사각형으로 가공하여 사용하였으며, 무게는 100g 정도이고, 가공깊이는 0.3mm까지 방전가공을 하였다.

Table 3 Chemical composition and properties of Cu electrode

Chemical composite (%)		Tensile Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Conductivity
Cu	Cr, Ti, Zr	25	15	102
99.9	small			

4. 실험결과 및 고찰

피크전류 4.5암페어[A]와 듀티팩터 0.24의 가공 조건으로 음향방출신호를 측정하여 주파수 분석을 한 것으로, Fig. 4는 방전가공 상태이고, Fig. 5는 초음파를 부가한 경우이다. 그림에서 나타난 것처럼 주기적인 전압 상태를 비교해 볼 때 Fig. 4인 경우 전압변화가 적게 나타났지만, 초음파를 부가

한 Fig. 5에서는 진압이 큰 쪽으로 증가한 것을 알 수 있다.

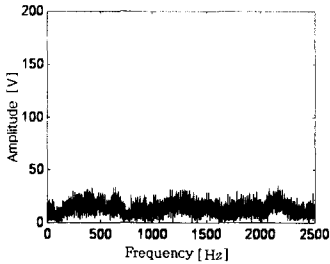


Fig. 4 Power spectrum density of AE signal for EDM without ultrasonic emission

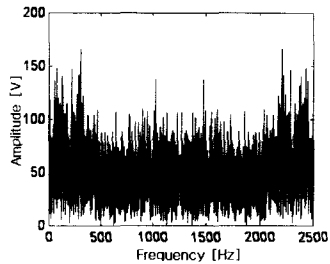


Fig. 5 Power spectrum density of AE signal for EDM with ultrasonic emission

그리고 전체적으로 주파수영역이 0~2500Hz에서 균일한 상태를 보여주고 있는데, 특히 초음파를 부가한 경우의 주파수영역이 0~250Hz와 2000~2500Hz에서 진압차이가 약간 생긴 것을 알 수 있다. 주파수영역 상태변화에서 공작물제거속도 및 방전가공면의 표면거칠기 상태를 평가할 수 있는데, 초음파를 부가하였을 경우 공작물제거속도가 증가하였고, 표면거칠기상태는 나빠진 것으로 보아 초음파가 방전가공면에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

방전가공과 초음파를 부가한 가공에서 피크전류와 듀티팩터에 따른 공작물제거속도 변화를 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 모든 가공에서 피크전류의 증가에 따라 공작물제거속도가 빠르다는 것을 확인할 수 있었고, 또한 초음파를 부가하였을 때 공작물제거속도가 증가하는 것을 알았다. 그리고 듀티팩터 0.24에서 0.3으로 증가할 경우에 공작물제거속도가 빠르다는 것을 확인할 수 있었

으나, 듀티팩터 0.45인 경우에는 오히려 감소한 것을 알 수 있다.

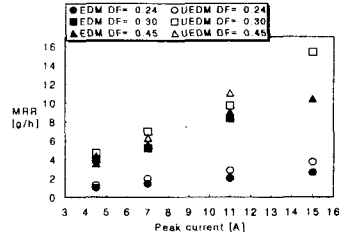


Fig. 6 Effects of peak current on MRR

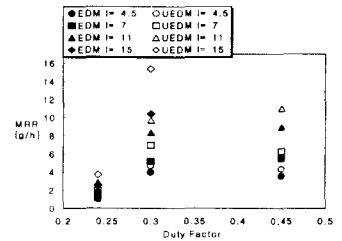


Fig. 7 Effects of duty factor on MRR

이것은 듀티팩터 0.24 ($\tau_{on}:48\mu s$, $\tau_{off}:152\mu s$)와 0.3 ($\tau_{on}:59\mu s$, $\tau_{off}:129\mu s$)인 경우에 비해 0.45 ($\tau_{on}:130\mu s$, $\tau_{off}:134\mu s$)는 방전시간이 휴지시간보다 상대적으로 길어 가공시 칩의 배출이 잘되지 않아 공작물제거속도가 오히려 감소한 것이라고 생각되어진다. 또한 듀티팩터 0.24와 0.3에서 많은 공작물제거속도차이를 보이고 있지만, 듀티팩터 0.3과 0.45의 상태에서는 큰 차이가 나타나지 않았다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 피크전류와 듀티팩터에 따른 방전가공과 초음파를 부가한 가공면의 최대 표면거칠기 상태를 비교하여 나타낸 것으로 동일 조건으로 4회 반복 측정된 것을 평균값으로 계산하여 보여주고 있다. 피크전류와 듀티팩터가 증가됨에 따라 표면거칠기 상태는 점차적으로 나빠지는 것을 알 수 있었고, 약간의 차이를 보이고 있지만 초음파를 부가한 가공면이 방전가공에서 얻은 가공면보다 나쁘게 나타났는데, 이것은 용융층 두께에 상관없이 가공중에 순간적으로 가공면이 용융됨과 동시에 초음파의 영향으로 일부분의 용융층면이 찢겨나간 상태로 남아 있기 때문이다.

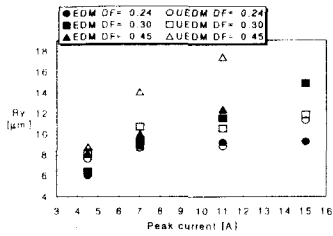


Fig. 8 Effects of peak current on R_{max}

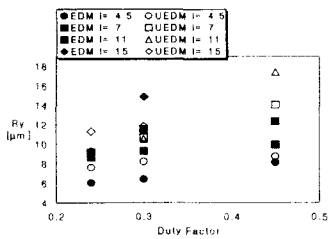
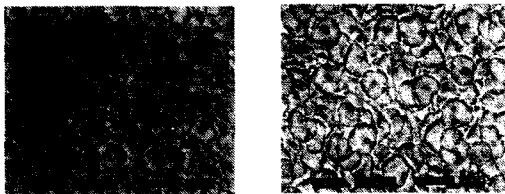


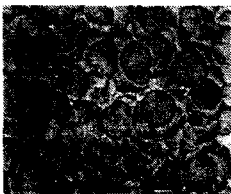
Fig. 9 Effects of duty factor on R_{max}

그리고 방전가공면에 대한 미세구조를 주사전자현미경으로 분석한 결과 모든 방전가공표면이 균일하게 100-200 μm 의 직경과 깊이 2-5 μm 의 분화구 모양의 방전자극으로 덮혀있는 미세구조가 무수하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다.



(a) DF : 0.24

(b) DF : 0.3



(c) DF : 0.45

Fig. 10 EDMed surface of the specimen with ultrasonic emission

방전자극들은 모든 가공조건에서 공통적으로 관찰되었으며, Fig. 10(a), (b) 및 (c)는 피크전류 4.5A이고, 듀티팩터 0.24, 0.3 및 0.45로 변화시키면서 초음파를 추가하여 가공한 표면 사진을 나타내고 있는데, 듀티팩터의 증가에 따라 방전자극의 직경이 크다는 것을 알 수 있었다.

또한 피크전류 4.5A와 듀티팩터 0.24의 가공조건을 이용하여 방전가공과 초음파를 추가하여 가공한 시편의 과단면을 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 보여주고 있으며, 초음파를 추가한 가공면의 용융층 두께는 2-3 μm 정도이고, 방전가공시 용융층 두께는 4-5 μm 로 나타났다.

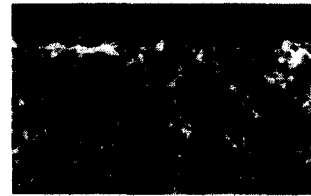


Fig. 11 SEM micrograph of cross-section of EDMed surface without ultrasonic emission



Fig. 12 SEM micrograph of cross-section of EDMed surface with ultrasonic emission

초음파를 추가하였을 경우 방전가공보다 용융층 두께가 얇은 것은 가공시 동시에 초음파가 용융되는 과정중에 영향을 미치기 때문이다.

Fig. 13은 연삭가공한 면을 방전가공과 초음파를 추가한 경우들의 가공면에서 얻은 꺾임강도값들을 이용하여 그림으로 나타낸 것이다. 미세조직상으로는 뚜렷한 차이를 발견할 수 없었지만, 방전가공 후 꺾임강도는 가공전에 비하여 큰 감소를 보이고 있으며, 방전가공한 경우 430MPa이나, 초음파를 추가하여 얻은 꺾임강도는 380MPa정도로 오히려 감소한 것을 확인할 수 있었다.

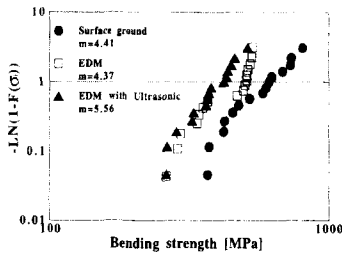


Fig. 13 Result of Weibull statistical analysis for the bending strength data of the samples machined by three different machining methods: abrasive grinding, and EDM with, and without ultrasonic emission.

이것은 초음파가 가공면에 영향을 미치지 때문이고, 초음파를 부가하여 얻은 가공면의 꺾임강도가 방전가공했을 경우보다 감소되었지만, 와이블분포의 형상모수를 비교해 볼 때 방전가공 형상모수 m 은 4.37로 나타났고, 초음파를 부가하여 얻은 형상모수 m 은 5.56으로 증가되어 신뢰도는 오히려 향상된 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 난삭재인 도전성 세라믹 복합체를 전극봉을 역극성으로 하여 방전가공과 동시에 초음파를 부가한 실험연구를 통해서 공작물제거속도, 표면거칠기, 미세구조 및 꺾임강도 분석 등으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

파크전류와 듀티팩터의 증가에 따라 방전가공보다 초음파를 부가했을 경우에 공작물제거속도가 증가하였고, 또한 표면거칠기 상태가 나쁜 것으로 나타났다. 전체적으로 가공된 표면에 100-200 μ m 직경과 깊이 2-5 μ m의 분화구 모양의 방전자국으로 덮혀있는 미세구조가 균일하게 분포되어 있고, 파크전류와 듀티팩터의 증가에 따라 방전자국의 크기가 큰 것을 알 수 있었다. 가공면의 파단면 분석에서는 초음파를 부가했을 경우 용융층 두께가 2-3 μ m로, 방전가공시 용융층 두께 4-5 μ m보다 얇고, 표면상태가 나빠졌으며, 꺾임강도가 적게 나타났는데, 이것은 가공중에 순간적으로 가공면이 용

융됨과 동시에 초음파의 영향으로 일부분의 용융층면이 벗겨나간 상태로 남아있기 때문이며, 꺾임강도에 따른 와이블분포의 형상모수를 비교해 볼 때 방전가공보다 초음파를 부가하였을 경우의 신뢰도는 오히려 향상된 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. N. Petrofes and A. Gadalla, "Electrical Discharge Machining of Advanced Ceramics," Ceramic Bulletin, Vol. 67, No. 6, pp. 1048-1052, 1988.
2. D. Kremer, J. L. Lebrun, B. Hosari and A. Moisan, "Effects of Ultrasonic Vibrations on the Performances in EDM," Annals of the CIRP, Vol. 38, pp. 199-202, 1989.
3. D. Kremer, C. Lhiaubet and A. Moisan, "A Study of the Effect of Synchronizing Ultrasonic Vibrations with Pulses in EDM," Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 211-214, 1991.
4. S. Koshimizu and I. Inasaki, "Hybrid Machining of Cemented Carbide(Combination of Ultrasonic Machining and Electrical Discharge Machining)," 日本機械學會 論文集(C編), 55卷 509号, pp. 197-200, 1989.
5. R. D. Cope and J. C. Brown, "An Investigation of Electrical Discharge Machining of Graphite/Epoxy Composites," Composites Manufacturing, Vol. 1, No. 3, pp. 167-171, 1990.