

전도성을 가지는 탄소나노튜브강화 알루미늄복합소재의 마이크로방전가공에서 초음파진동 부가에 의한 가공특성

강명창*, 탁현석**, 이창훈*, 김남경****

(*부산대학교 융합학부, **포스코(광양) 후판기술개발팀, ****경남과학기술대학교 자동차공학과)

Machining characteristics on ultrasonic vibration assisted micro-electrical discharge machining of carbon-nanotube reinforced conductive Al₂O₃ composite

Myung-Chang Kang*, Hyun-Seok Tak**, Chang-Hoon Lee*, Nam-Kyung Kim****

(Received 4 December 2014; accepted 22 December 2014)

ABSTRACT

Micro-holes of conductive ceramic are required in micro structures. Micro-electrical discharge machining (Micro-EDM) is an effective machining method since EDM is as process for shaping hard metals and complex-shaped holes by spark erosion in all kinds of electro-conductive materials. However, as the depth of micro hole increases, the machining condition becomes more unstable due to inefficient removal of debris between the electrode and the workpiece. In this paper, micro-EDM was performed to evaluate machining characteristic such as electrode wear, machining time, taper angle, radial clearance with varying voltage and ultrasonic vibration on 10 vol.% Carbon-nanotube reinforced conductive Al₂O₃ composite fabricated by spark plasma sintering in previous research.

Key Words : CNT reinforced Conductive Al₂O₃ composite(탄소나노튜브 강화 전도성 알루미늄 복합소재), Micro-EDM(마이크로방전가공), Ultrasonic vibration(초음파 진동), Micro-hole(미세구멍), Machining characteristic(가공특성)

1. 서 론

최근 산업화의 소형화 추세에 따라 미세형상가

공기술에 대한 관심이 높아지고 있으며 특히 고종 황비의 미세구멍형상의 경우 1960년대 디젤엔진의 연료분사 노즐구멍에 이용하기 위한 필요성이 제기된 이후 오늘날 미세구멍의 용도는 잉크젯 프린터 헤드의 노즐, 광전자섬유 커넥터, 미세섬유 사출노즐 등의 일반용도 이외에 서보 제어용 밸브, 계측장비 요소부품 및 합성섬유 가공 및 최근에는 위성통신 부품에 이르기까지 광범위하게 확대되고 있다^[1]. 구조 세라믹 중 알루미늄(Al₂O₃)는 높은 경도(High hardness) 및 열충격저항성(Thermal

* Graduate School of Convergence Science, Pusan UNIV.

** Gwangyang Steel Works, POSCO Ltd.

**** Corresponding Author :

Dept. of Automotive Engineering,
Gyungnam National UNIV. of Science and Technology
E-mail : nkkim@gntech.ac.kr

shock resistance), 화학적 안정성(Chemical stability) 과 고온에서의 고강도 및 고강성과 내마모성, 산화 안정성 등으로 인해 실린더라이너, 베어링, 항공기 및 자동차용 부품 등의 요소부품소재로 이용되고 있다^[2]. 그럼에도 불구하고 알루미늄의 본질적 특성인 높은 취성으로 인해 기계적 가공이 어려워져 산업적 응용에 많은 어려움을 가지고 있다.

마이크로방전가공(Micro-electrical discharge machining, Micro-EDM)은 재료의 물성에 관계없이 전기전도도를 가지는 소재에 대해서 가공이 가능하다는 장점으로 인해 최근 세라믹재료를 방전가공하기 위해 열적 및 기계적 특성뿐 만 아니라 높은 전기적 특성을 가지는 카본재료를 이용하여 세라믹소재를 방전가공에 적용하기 위한 연구들이 보고되고 있다^[3,4]. 마이크로 방전가공으로 수십 마이크로미터 직경을 가지는 미세구멍가공을 위해서는 원활하게 가공부스러기(Debris)를 배출시켜 전극마모를 줄이고 가공효율을 높여야 한다. 이에 몇몇 연구자들은 방전가공효율을 높이기 위해 절연액으로 탈이온수를 이용하거나^[5] 부가적인 축전용량을 이용하여 가공중 발생하는 부스러기를 원활하게 배출할 수 있는 방법을 제안하고, 또한 수조에 초음파진동장치를 부착하여 수조탱크에 담긴 절연액의 진동을 통해 미세구멍 내부의 가공부스러기를 제거하는 연구를 수행하였다^[6,7]. 그러나 현재까지는 산업적 응용가능성이 높은 세라믹소재에 전도성을 부여하는 새로운 복합소재에 대한 연구가 활발하게 진행되는 것에 반해서, 실제 마이크로방전가공에 의한 가공부스러기를 효율적으로 제거하기 위한 연구는 거의 보고가 되고 있지 않은 실정이다.

이전 연구에서 고에너지 펄스형 스파크 플라즈마 소결법 (Spark Plasma Sintering, SPS-825, SYNTEX INC.)을 이용하여 CNT 함유량 변화에 따라 hybrid Al_2O_3/CNT 세라믹 복합소재를 제조하여 물성 및 전기전도도(Electrical conductivity)를 평가한 결과 알루미늄(Al_2O_3 , AES-11, Sumitomo chemical) 분말에 10Vol.% CNT를 첨가하여 제조한 복합소재의 경우 높은 전기전도도로 인해 방전가공 적용이 용이한 것을 확인하였다^[8].

본 연구에서는 마이크로 방전가공으로 10vol.% CNT 강화된 전도성 Al_2O_3 복합소재의 미세구멍가공 시 효율적인 가공부스러기 제거를 위하여 초음파 가진 여부와 방전에너지에 큰 영향을 미치는 전압의 변화에 따라 전극마모량 (Electrode wear volume), 가공시간 (Machining time), 반경 방향 간극 (Radial clearance), 테이퍼 각도 (Taper angle) 그리고 전계방사 주사전자현미경 (Field Emission Scanning Micro Scope, S4800, Hitachi)을 이용하여 구멍가공에서의 형상특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 초음파진동 부가 마이크로방전가공기

Fig. 1은 초음파 가진 마이크로 방전가공의 모식도와 실제 실험장치를 나타내었다. 마이크로 방전가공기 (Hyper-15, Hybrid precision)는 이송거리 125mm (X axis) x 65mm (Y axis) x 65mm (Z axis)와 이송 분해능 $0.1\mu m$ 를 가지고 있다. 방전회로는 $0.1\mu s$ 이내의 펄스폭과 상대적으로 높은 전류 피크치를 얻을 수 있어 저에너지, 고주파 방전이 요구되는 마이크로 방전가공에 적합한 RC형 방전회로를 사용하였다. 그리고 입력 전류 (50Hz or 60Hz)를 20kHz, 40kHz의 전기 에너지로 변환할 수 있는 파워 서플라이 (Power supply)와 변환된 전기에너지를 기계적 진동 에너지로 출력시키는 진동자 (Transducer) 등으로 구성된 초음파진동 장치 (Ultrasonic vibrator, Daesung Ultrasonic co)를 사용하였다. 실험시 초음파 진동에 의한 간섭으로 미세전극에 영향을 미칠 수 있어

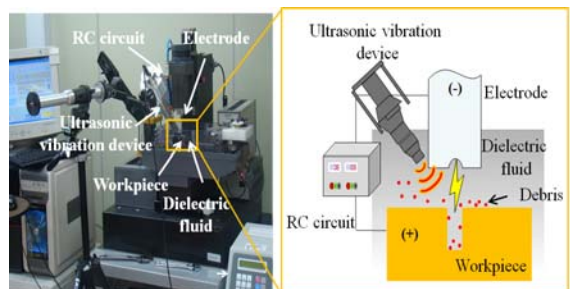


Fig. 1 Photograph of experimental set-up and schematic diagram of ultrasonic assisted micro-EDM

이를 고려하여 진동 주파수는 40kHz로 높게 설정하였다. Table 1은 Al₂O₃/10vol.% CNT 복합소재를 초음파 가진 마이크로 방전가공실험의 가공조건을 보여준다. 전극 직경 200 μ m의 텅스텐 전극과 두께 1,000 μ m의 복합소재를 사용하였다. 또한, 고순도의 mineral oil을 절연액으로 사용함으로써 극간의 방전발생을 더욱 원활하게 하였다. 마이크로 방전가공시 초음파 진동을 가하는 방법은 간접적인 방법과 직접적인 방법이 있다. 간접적인 방법의 경우 수조아래에 초음파 장치를 부착시켜 절연액 진동을 통한 가공부스러기 배출을 돕는 방법이다¹⁶⁻¹⁷.

그러나 이러한 방법은 초음파 진동이 가공기의 X-Y 스테이지로 전달되어 기계에 영향을 미칠 수 있으며 이를 방지하기 위해서는 다른 부가적인 구조물을 장착해야 하는 어려움이 있다.

2.2 전도성 세라믹 복합소재의 마이크로 방전가공 특성평가방법

Fig. 2는 이전연구에서 제조된 카본나노튜브 강화 전도성 Al₂O₃ 세라믹 복합소재의 모식도를 나타내었다. 고에너지 펄스에너지를 사용하는 SPS로 전도성 세라믹 복합소재를 소결시 Al₂O₃의 입자(Grain)가 성장하는 동시에 카본나노튜브가 입계(Grain boundary)에 분산된다⁹. 복합소재를 미시적인 관점에서 본다면 입계에 분산된 카본나노튜브의 높은 전기전도도 (10⁷S/m) 및 가는 튜브 형태로 인해 Al₂O₃ 입계에서 전기적 통로(Electrical path)를 형성하게 된다¹⁰. 마이크로방전가공이 시

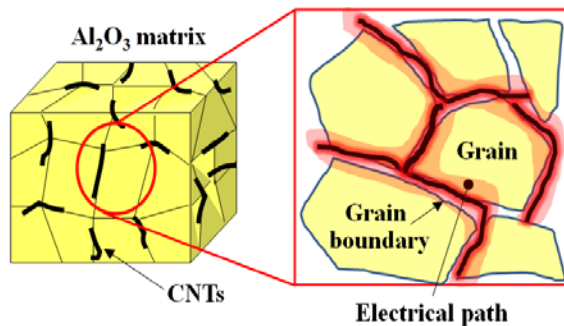


Fig. 2 Schematic diagram of conductive ceramic composite

Table 1 Machining conditions for micro-EDM with ultrasonic vibration

Workpiece	Al ₂ O ₃ /10vol.% CNT
Workpiece thickness(μ m)	1,000
Electrode diameter(μ m)	200
Electrode material	Tungsten (W, Korea tungsten)
Dielectric fluid	Mineral oil (IME-MH,Germany)
Ultrasonic vibration	On, Off
U.V. Frequency(kHz)	20, 40
Applied voltage(V)	150, 200, 250
Capacitance(nF)	10
Feed rate(μ m/sec)	1
Spindle speed(rpm)	1,000

Table 2 Material properties of 10vol.% CNT reinforced conductive Al₂O₃ composite^[8]

Relative density(%)	98.23
Hardness(GPa)	13.8
Electrical conductivity(S/cm)	2 x 10 ⁴

작되면 복합소재의 국부적인 부분에 방전이 발생하며 방전으로부터 발생한 전기적 및 열적에너지는 Al₂O₃의 입계에 형성된 카본나노튜브의 전기적 통로를 따라 복합소재에 전달되고 Al₂O₃ 입자들은 용융되고 기화되어 가공된다. Fig. 3은 전도성 세라믹 복합소재의 초음파진동 부가 마이크로방전가공특성을 평가하기 위한 방법을 나타낸 그림이다. 물성평가를 통해 10vol.% 탄소나노튜브 강화된 Al₂O₃ 복합소재가 방전가공 수행이 용이한 것을 확인하였으며 Table 2는 제조된 전도성 세라믹 복합소재의 기계적특성 및 전기전도도값을 나타내었다^[8]. 예비실험을 통한 복합소재의 마이크로방전가공조건선정과 이를 토대로 초음파 부가 마이크로방전가공을 수행하였다. 가공특성평가는 가공형상에 영향을 주는 전극마모 및 반경 방향 간극과 테이퍼각도를 측정하였으며 동시에 가공시간을 측정하였다. 본 연구에서 사용된 방법은 초음파 직접 부가방식으로서 미세구멍 가공시 구멍내부의

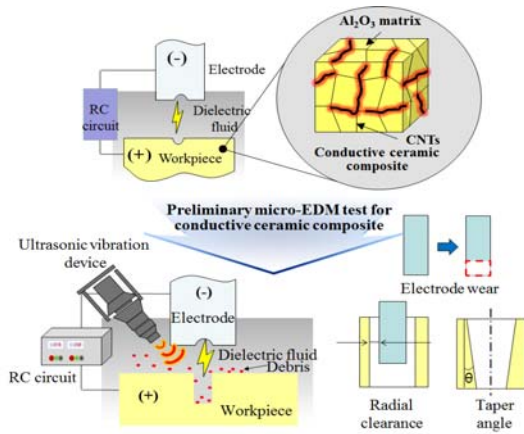


Fig. 3 Schematic process for machining characteristics evaluation of ultrasonic vibration assisted micro-EDM on conductive ceramic composite

가공부스러기 배출을 더욱 원활하게 하기 위해 절연액 속의 전극과 복합소재 극간의 방전이 발생하는 부위에 직접적으로 초음파 진동을 추가하는 방법을 사용하였다. 이번 실험에서는 가공부스러기를 원활히 배출하기 위한 목적으로서 종진동이 사용되었다. 방전가공조건은 초음파가진 및 방전 에너지($E=CV^2/2$)에 따른 가공특성을 알아보기 위해 초음파가진 여부(On, Off) 및 에너지 변화가 큰 전압(V)을 변화시켜 실험하였다. 전극마모량은 가공 전·후에 전극을 복합소재에 터치하여 좌표를 기록하여 전극마모를 계산하였고^[11], 반경 방향 간극은 전극의 직경과 가공 후 복합소재의 입·출구부의 직경을 측정 후 그 차이를 측정하였다. 테이퍼각도는 입구 및 출구부의 반지름의 차이를 구멍의 깊이로 나눈 후 아크탄젠트(Arctan)를 취한 값을 계산하여 측정하였다^[12].

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초음파진동에 따른 전극마모량과 가공시간의 변화

축전용량과 이송속도 그리고 스피들 회전수는

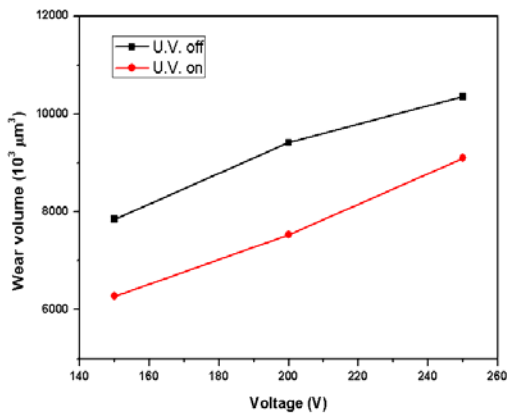
고정된 값을 사용하고, 방전특성에 큰 영향을 미치는 전압을 다르게 변화시켜가면서 가공특성을 조사하였다. 방전부위에 40kHz 초음파 진동의 가진 여부에 따라 1,000 μ m 두께의 Al₂O₃/10vol.% CNT 복합소재 시편에 관통구멍을 가공한 후에 전극 마모량과 가공시간을 측정한 결과가 Fig. 2에서 보여준다. Fig. 4(a)에서 방전부에 초음파진동을 가진한 경우가 가진을 하지 않은 경우보다 약 25%정도 전극 마모량이 적게 발생함을 알 수 있었다. 이는 초음파 진동을 가진하면 미세구멍 가공시 구멍내부의 가공부스러기의 배출을 원활하게 하여 2차 방전에 의한 전극의 손실이 줄어든 것으로 생각된다. 또한 초음파 진동 가진 유무에 상관없이 전압이 증가할수록 전극 마모량은 증가하였고, 전극 마모율의 폭도 비슷한 경향을 보였다. 이는 방전에너지의 증가로 인해 전극과 피삭재에 영향을 미치게 때문이다^[11]. Fig. 4(b)에서는 초음파진동 가진 시 약 20%정도 가공시간을 줄일 수 있었으며, 이는 Fig. 4(a)에서 설명한 바와 마찬가지로 초음파진동을 가진하지 않은 경우 구멍내부의 가공부스러기로 인해 전극과 소재간의 방전지연현상으로 인해 가공시간이 길어질 수 있으며 초음파진동 가진 조건에서 전압변화에 상관없이 전반적으로 가공시간이 감소한 것으로 생각된다.

3.2 초음파진동에 따른 반경 방향 간극과 테이퍼 각도의 변화

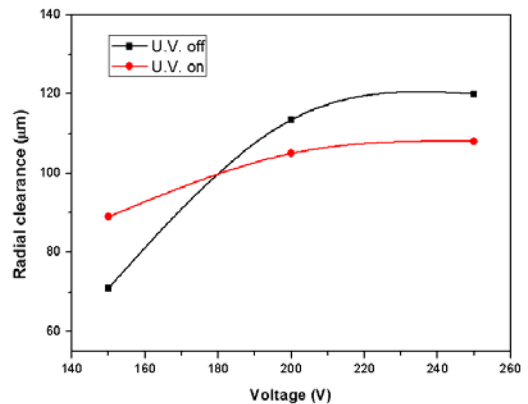
Fig. 5는 초음파진동 가진 여부와 전압변화에 따른 반경 방향 간극과 테이퍼 각도를 나타낸다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 초음파진동을 가진했을 때 대체적으로 반경방향간극이 작은 것을 알 수 있다. 초음파진동 가진 여부에 상관없이 반경 방향 간극의 경우 전압이 증가할수록 증가하는 경향이 있다. 전압이 증가하면서 극간의 극부적인 지점에서 전류밀도가 증가하며 높은 열에 의해 가공물이 용융되고 기화된다. 용융되고 기화된 가공부스러기들은 초음파를 가진 하지 않은 경우 전극표면에 용착 되고 이는 전극 직경 증가의 원인으로 작용되며^[13]반경방향간극 증가의 원인으로 생각된다. 다만 낮은 전압과는 달리 높은 전압

에서 방전발생 시에 반경 방향 간극은 점점 완만해지는 경향이 있다. 이는 짧은 펄스 및 높은 전류 피크치를 가지는 RC형 회로가 장착된 마이크로방전가공특성으로 인해 순간방전충격파가 극도로 커지며 이로 인해 전극표면에 융착되어 있던 가공 부스러기들이 제거된 것이 원인으로 생각된다. 이는 Fig. 4(b)의 그래프와 같이 전압 200V 이상에서 가공시간이 줄어드는 것과 관계가 있다고

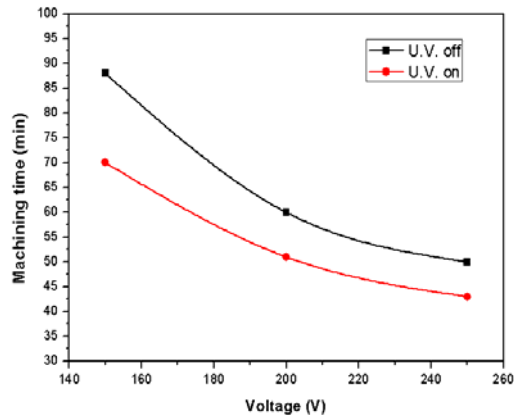
생각한다. 또한 초음파진동을 가진한 경우 반경방향 간극의 차이가 작음을 알 수 있으며, 이는 가공치수 정밀도 측면에서 우수하다. Fig. 5(b)는 초음파가진 여부와 전압변화에 따라 테이퍼각도를 나타내었다. 전반적으로 초음파진동을 가진하지 않은 경우 테이퍼각도가 작은 것을 알 수 있다. 이는 입구와 출구의 직경 차이가 작다는 것을 의미한다. 결과적으로 본다면 초음파진동을 직접적



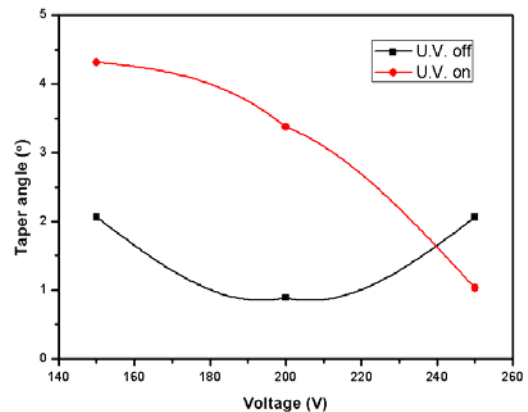
(a) Electrode wear volume according to change of voltage and ultrasonic vibration



(a) Radial clearance according to change of voltage and ultrasonic vibration



(b) Machining time according to change of voltage and ultrasonic vibration



(b) Taper angle according to change of voltage and ultrasonic vibration

Fig. 4 (a) Electrode wear volume and (b) machining time according to change of voltage and ultrasonic vibration (hole depth : 1000 μm)

Fig. 5 (a) Radial clearance and (b) taper angle according to change of voltage and ultrasonic vibration (hole depth : 1000 μm)

으로 방전발생부에 가진 하였을 시 미세구멍내의 가공부스러기 배출 이외에 초음파 진동이 전극에 직접적으로 영향을 미쳐 입구와 출구의 직경차이가 심해진 것으로 생각된다. 초음파가진 및 전압 250V 조건으로 복합소재 가공 시 오히려 초음파진동 및 원활한 가공부스러기 배출로 인해 가공시간 및 테이퍼각도가 감소한 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 초음파진동으로 인한 구멍내부의 가공부스러기 배출과 높은 전압에서의 순간방전충격파가 전극표면 및 구멍내부의 가공부스러기들을 제거 및 배출한 것이 원인이라 생각한다.

3.3 초음파진동에 따른 구멍형상특성

Fig. 6은 초음파진동 가진 여부에 따라 미세구멍의 입구 부의 가공형상을 FE-SEM으로 촬영한 사진이다. Fig. 6(a), (c) 및 (d)는 초음파진동 가진 없이 가공한 결과이고, Fig. 6(b), (d), (f)는 초음파진동을 가진한 결과이다. 초음파진동을 가진한 경우보다 가진하지 않은 경우가 미세구멍의 진원도(Circularity)가 더욱 우수한 것을 확인할 수 있다. 이는 초음파진동을 직접 방전발생부에 부가한 것이 원인으로 생각되며, 사진에서 볼 수 있듯이 가공형상에 영향을 미쳤다. 미세구멍의 입구부 주위에 떨어져 나간 형상을 볼 수 있는데 이는 세라믹 가공의 특징이나 이보다 초음파진동으로 인해 전극의 형상이 전사되어 가공되는 것이 특징인 방전가공에서는 오히려 전극이 초음파 진동의 영향을 받아 이러한 현상이 더욱 심해진 것으로 생각된다. 또한 전압이 증가할수록 방전에너지가 증가하고 구멍의 직경도 초음파진동 미가진시 342 μ m에서 440 μ m로 증가하였으며, 초음파진동 가진 시 376 μ m에서 438 μ m로 증가하였으며 가공면의 상태는 더욱 악화되었다. Fig. 7은 초음파진동 가진 여부에 따라 방전가공 후 미세구멍의 출구부를 E-SEM으로 촬영한 사진이다. Fig. 7(a)와 (c)는 초음파진동을 가진 하지 않은 경우이고, Fig. 7(b)와 (d)는 초음파진동을 가진하였을 경우를 보여준다. 초음파진동을 가진한 방전가공의 경우 미세구멍의 형상이 타원으로 플러싱 효과를 이용하여 원활한 가공부스러기 배출을 시키기 위해 가공부에 직접적으로 초음 파진동을 가진 하는 방식의 단점으로 확인된다. 그리고 종파의 초음파진동이 전극에 영향을 주었고

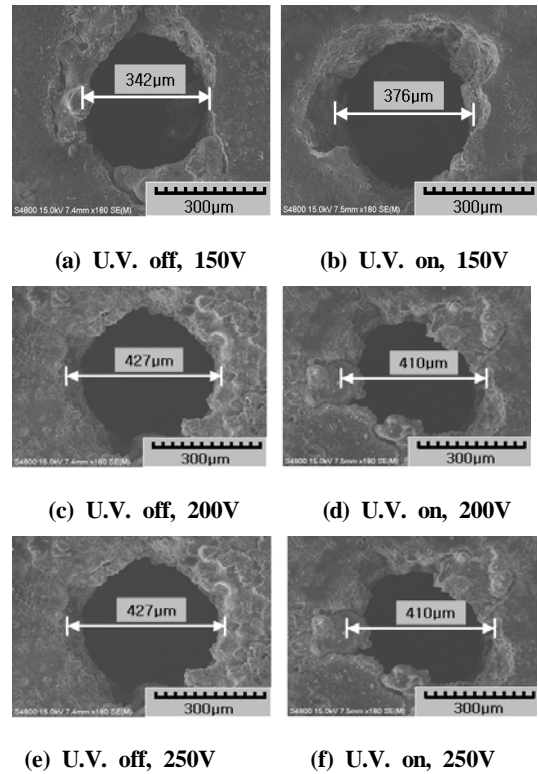


Fig. 6 FE-SEM images of the machined entrance hole according to change of voltage and U.V. on, off (Frequency : 40kHz, Capacitance : 10nF)

결과적으로 가공부가 타원형상으로 가공되었음을 알 수 있다. Fig. 6은 20kHz와 40kHz의 초음파진동을 가진 하였을 때의 가공결과이다. Fig. 6에서 20kHz와 40kHz의 초음파진동 가진 조건에서 미세구멍 주변부에서 열적변형이 심하게 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 초음파진동 가진을 통해 미세구멍내의 가공부스러기가 배출되는 동시에 방전이 발생하면서 입구 주변에서 배출되는 가공부스러기에 의한 2차방전이 발생한 것으로 생각된다. Fig. 8(a)에서 20kHz의 주파수로 초음파진동을 극간에 가진하면 사진에서 확인할 수 있듯이 입구 및출구부가 전체적으로 타원형상인 것을 알 수 있으며 이는 가공 시 전극이 초음파진동에 전반적으로 영향을 받은 것을 의미한다. Fig. 8(b)는 40kHz의 주파수로 초음파진동을 가진한 마이크로방전가공에서 출

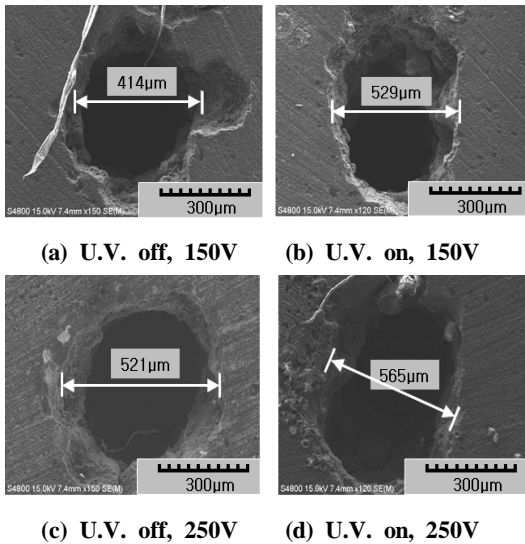
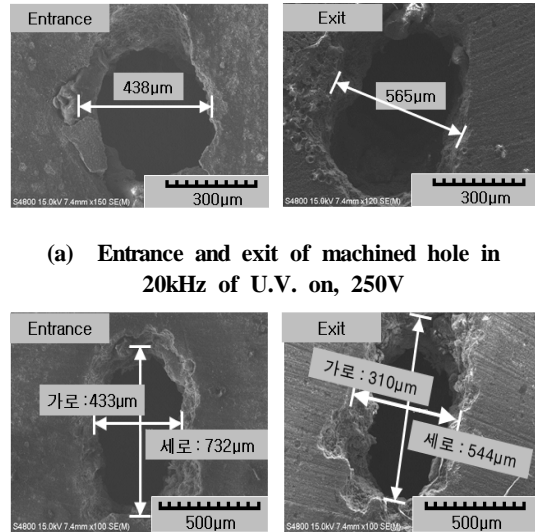


Fig. 7 FE-SEM images of the machined exit hole according to change of voltage and U.V. on, off (Frequency : 40kHz, Capacitance : 10nF)

구부의 형상만 타원인 것을 알 수 있으며, 이는 출구부에서 초음파진동으로 인해 전극이 영향을 받았음을 알 수 있다. 위의 결과로부터 전도성 세라믹 복합소재에 미세구멍가공을 위해 초음파를 방전부에 직접 가진 마이크로 방전가공을 이용한 경우 전극의 떨림으로 인해 전반적으로 구멍형상특성에 악영향을 미쳤다. 하지만 실험을 통해 전도성 세라믹 복합소재의 미세구멍가공측면에서 초음파와 마이크로방전가공의 하이브리드 공정을 통해 가공특성을 파악할 수 있었으며 이는 향후 고기능성 복합소재의 2D, 3D 등 다양한 형상을 가공하기 위한 자료로서 활용될 수 있다고 생각한다.

4. 결론

고에너지 스파크 플라즈마 소결법으로 제조된 전도성 Al₂O₃/10vol.% CNT 복합소재에 관해 초음파진동 가진 여부와 방전에너지의 조건변화에 따라 가공특성을 평가하였다. 미세구멍의 정밀가공 실현을 위해 마이크로방전가공에 초음파진동을 가진 하이브리드 공정사용을 통해 전극 마모량



(a) Entrance and exit of machined hole in 20kHz of U.V. on, 250V

(b) Entrance and exit of machined hole in 40kHz of U.V. on, 250V

Fig. 8 FE-SEM images of the machined hole according to change of ultrasonic vibration frequency

25% 정도 감소, 가공시간 20% 정도 감소, 반경 방향 간극 약 9% 감소하였다.

향후, 전도성 세라믹 복합소재에 대한 초음파가진 마이크로방전가공조건 최적화 연구를 수행하여 가공형상을 개선한다면 미세구멍형상을 가지는 다양한 제품에 응용할 수 있으리라 생각된다.

후 기

이 논문은 2014년도 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구됨

REFERENCES

1. Heo, S. G., Lee, W. K., Min, B. K., Je, T. J., "Review of recent progress in micro-milling process research", J. of KSMPE, Vol. 11, No. 2, pp. 20-26, 2012.

2. Shin, B. S., Lee. J. H. "Basic experimental investigation to uv laser micro-machining of nano-porous alumina ceramic material", J. of KSMPE, Vol. 11 No. 1, pp. 62-67, 2012.
3. Abdus, S., Mohammad. Y. A., MD. A. M., Abdul. A. K., "Investigation of material removal characteristics in EDM of Nonconductive ZrO₂ ceramic", Procedia Engineering, Vol. 56, pp. 696-701, 2013.
4. Chenjun, W., Li, Z., Dejin, H., Jun, N., "Electrical discharge machining of ceramic matrix composites with ceramic fiber reinforcements", Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 64, pp. 187-194, 2013
5. Chung, D. K., Shin, H. S., Kim, B. H., Park, M. S., Chu, C. N., "Surface finishing of micro-EDM holes using deionized water", J. Micromesh. Microeng., Vol. 19, No. 4, 045025, 2009
6. Je, S. U., Kim, D. W., Lee, H. S., Chu, C. N., "Micro EDM with ultrasonic work fluid vibration for deep hole machining", J. of KSPE, Vol. 22, No. 7, pp. 47-53, 2005
7. Seo, D. W., Park, M. S., Yi, S. M., Chu, C. N., "Straight hole micro EDM with a cylindrical tool using a variable capacitance method accompanied by ultrasonic vibration", J. Micromech. Microeng. Vol. 16, No. 5, pp. 1092-1097, 2006
8. Tak, H. S., Ha, C. S., Lee, H. J., Lee, H. W., Jeong, Y. K., Kang, M. C., "Characteristics of Al₂O₃/CNTs hybrid materials for micro-electrical discharge machining", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 21, pp. 28-32, 2011
9. Sung, J. W., Kim, N. K., Kang, M. C., "Material properties and machining performace of CNT and Graphene reinforced hybrid alumina composites for micro electrical discharge machining", J. of KSPMPE, Vol. 12, No. 6, pp. 3-9, 2013
10. Takafumi, K., Tohru, S., Koichi, N., "Production of a grain boundary phase as conducting pathway in insulating AlN ceramics", Acta Materialia, Vol. 55, pp. 6170-6175, 2007
11. Tsai, Y., Masuzawa, T, "An index to evaluate the wear resistance of the electrode in micro-EDM", J. Mater. Process., Vol. 149, pp. 304-309, 2004
12. Jahan, M. P., Wong, Y. S., Rahman, M., "A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator", J. Mater. Process., Vol. 209, No. 4, pp. 1706-1716, 2009
13. Liu, C. C., "Microstructure and tool electrode erosion in EDM of TiN/Si₃N₄ composites", J. Mater. Process., Vol. 363, No. 1-2, pp. 221-227, 2003