

도전성 탄화티타늄 이차상을 포함하는 산화알루미늄을 세라믹 복합체의 방전가공

윤준도 · 왕덕현* · 안영철** · 고철호

경남대학교 무기재료공학과

*경남대학교 기계공학부

**경남대학교 화학공학과

(1997년 9월 10일 접수)

Electrical Discharge Machining of Alumina Ceramic Matrix Composites Containing Electro-conductive Titanium Carbide as a Second Phase

Jondo Yun, Duck-Hyun Wang*, Young-Cheol Ahn** and Cheolho Go

Department of Inorganic Materials Engineering, Kyungnam University

*Department of Mechanical Engineering, Kyungnam University

**Department of Chemical Engineering, Kyungnam University

(Received September 10, 1997)

요 약

전기절연성 산화알루미늄을 基質로 하고 전기전도성 탄화티타늄을 이차상으로 포함하는 세라믹 복합체에 대한 방전가공을 시도하였는데, 가공성이 양호한 것으로 나타났다. 방전조건으로서 가공전류와 듀티팩터를 증가시키기에 따라 방전가공속도는 증가하였으나, 표면거칠기도 함께 증가하는 것으로 나타났다. 가공표면은 100-200마이크론 직경의 둥근 분화구 모양의 방전자국으로 덮여 있었으며, 가공메카니즘은 용융증발기주로 분석되었다. 가공후 꺾임 강도가 44% 감소하였으나 와이블 계수는 2배 이상 증가하였다. 방전가공을 배럴 연마와 복합적으로 시행할 경우, 가공 후 꺾임 강도는 거의 저하되지 않는 것으로 나타났다. 유한요소법으로 모사 분석하여 방전시 시편내부의 온도 분포를 구하였는데, 그 등온선 모양이 방전자국의 모양과 유사하였다.

ABSTRACT

Electrical discharge machining (EDM) was attempted on a ceramic matrix composite containing non-conductive alumina as a matrix and conductive titania as a second phase, and was found successful. As the current or duty factor increased, the material removal rate (MRR) increased and the surface roughness also increased. The EDMed surface was covered with a number of craters of a circular shape having 100-200 microns of diameter. The melting and evaporation was suggested for the EDM mechanism. The bending strength decreased 44% after EDM, but the Weibull modulus increased more than twice. Combination of EDM and barrel polishing resulted in the maintenance of the bending strength level. Temperature distribution near a spark in the sample was computer-simulated by use of finite element method, and was found to have similar shape to the one which the observed craters have.

Key words : Electrical discharge machining, Ceramic matrix composites, Material removal rate, Bending strength, Weibull modulus

1. 서 론

산업의 고도화에 따라 기계, 전자, 자동차, 항공기, 장비 등의 부품은 보다 높은 치수정밀도가 요구되고 있고, 그에 따라, 재료를 필요한 형상과 크기에 맞게 정밀 가

공하는 것이 매우 중요해지고 있다. 재료의 가공은 일반적으로 절삭, 연삭에 의한 기계적 가공이 주로 사용되고 있으며 특수가공방법으로 초음파가공, 방전가공, 레이저가공, 복합가공 등의 새로운 가공기술이 개발되어 시도되고 있다¹⁾. 이 중 방전가공은 재료에 전극을 근접시키

고 전압을 가하여 둘 사이에 스파크방전을 형성시키고 그에 따라 발생하는 고열로 재료를 미세하게 용융, 증발시켜 제거함으로써 가공하는 방법이다. 이 방법은 가공속도가 빠르고, 복잡한 형상으로의 가공이 가능하며, 가공비용이 적게 든다는 이점이 있다.^{2,3)} 그러나, 피가공재료가 전기전도성을 가져야 한다는 제약이 있어서, 이 방법은 주로 금속재료의 정밀가공에 사용되어 왔다. 세라믹재료는 일반적으로 전기비저항이 높아서 부도체에 속하나 일부 친이금속의 탄화물, 질화물, 붕화물에 해당하는 세라믹재료는 $10^3 \mu\Omega\text{cm}$ 이하의 낮은 비저항을 갖고 있어서 전기전도도가 상당히 높다.⁴⁾ 이들 도전성 세라믹재료와, 이를 이차상으로 함유하는 세라믹복합체는 방전가공이 가능할 정도의 전기전도성을 갖고 있다. 과연, TiB_2 , $\text{TiB}_2\text{-SiC}$, $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$, 등 수종의 전기전도성 세라믹과 복합체에 대한 방전가공이 시도되어 가공이 가능하다는 것이 확인되었다.⁵⁻¹⁰⁾

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 복합체는 상대적으로 값이 싼 산화알루미늄을 기질로 하고 있고 경도가 매우 높은 탄화티타늄을 이차상으로 하고 있어서 기계적 성질이 우수하고 절삭공구로서 이미 상용화되어 있는 재료이다. 또한, 탄화티타늄은 도전성이 우수하여 산화알루미늄에 TiC 적당량 이상을 첨가하여 복합체를 제조할 경우 기계적 물성이 좋으면서도 방전가공법으로 가공할 수 있다는 이점이 있다. 그러나, 이러한 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 복합체의 방전가공에 대하여서는 연구결과가 극히 드물고 가공 최적조건이 분명하지 않으며, 가공 후 기계적 성질이 조사되어 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 도전성 이차상으로 탄화티타늄을 함유하는 산화알루미늄계 복합체에 대한 방전가공을 시도하고 가공조건을 달리하면서 가공속도와 표면거칠기를 조사하여 가공의 최적조건을 잡고, 방전가공이 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하고, 가공 후 미세구조분석과 유한요소분석을 통하여 가공메카니즘을 이해하고자 한다.

2. 방전가공 이론^{11,12)}

방전가공은 전극봉과 피삭재 사이에 스파크 방전을 발생시켜 그 열로 국부적으로 소재를 가공하는 특수가공방법이다. 방전가공에는 와이어컷 방전가공과 형조(다이싱킹)방전가공의 두 가지가 있고 전자는 와이어로 가공하는 방식으로 주로 금형 제작에 사용되며 후자는 입의 형상의 전극봉을 사용하여 원하는 모양으로 가공하는 방식이다. 방전가공중에는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 피삭재와 전극사이에 존재하는 방전액에서 절연과 피로 방전이 일어나며, 방전액은 플라즈마 상태가 되고 그 열로 피삭재가 가공된다.

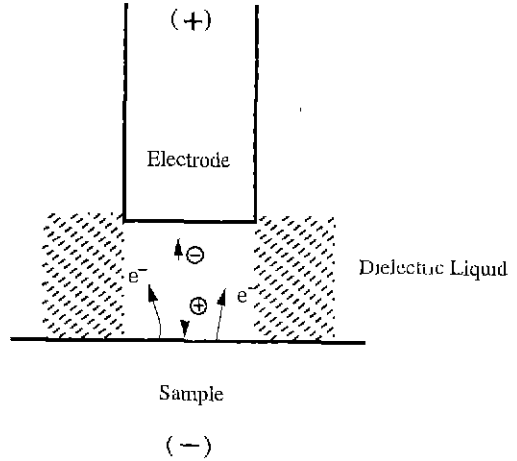


Fig. 1. Schematic diagram of electrical discharge machining process with negative polarity.

방전가공시 소모되는 에너지, E는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$E = 1/2 VI t \tag{1}$$

여기서 V는 간극전압, I는 방전전류, t는 전류가 흐르는 시간을 나타낸다. 가공속도는 시간당 피삭재 제거량인 공작물제거속도(material removal rate, MRR)로 나타낼 수 있는데, 이는 전류와 듀티팩터의 함수이다. 전극과 피삭재 사이에 전압은 펄스로 가하는데, 실제 방전이 일어나는 방전시간의 펄스주기에 대한 분율을 듀티팩터(duty factor)라 하며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{듀티팩터} = \frac{\tau_{on}}{\tau_w + \tau_{on} + \tau_{off}} \tag{2}$$

여기서, τ_{on} 은 방전시간, τ_w 는 유도시간, τ_{off} 는 휴지시간을 뜻한다(Fig. 2).

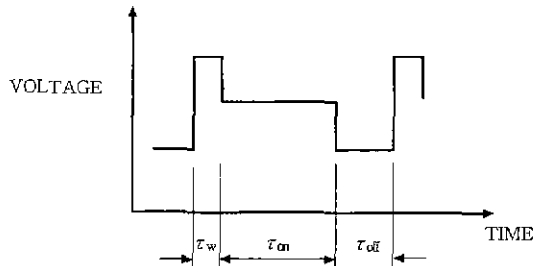


Fig. 2. Schematic diagram of discharge pulse showing induction time (τ_w), on time (τ_{on}) and off time (τ_{off}).

3. 실험 방법

방전 가공에 사용한 시편은 산화알루미늄 기질에 탄화티타늄 33 무게%를 포함하는 세라믹 복합체로, 절삭 공구에 사용되는 상용의 재료(쌍용양회社, 세라비트 ST100)를 사용하였다. 이들 시편을 형조 방전가공장치를 이용하여 5×10 mm²의 단면형상을 갖는 구리 전극으로 상부 표면으로부터 1-5 mm 깊이까지 가공하였다. 방전시 전극을 양극으로 하고 시편을 음극으로 하는 역극성 가공을 하였다. 역극성 가공을 한 이유는 전류의 방향을 반대로 하는 정극성 가공보다 가공속도가 빠르고 가공 후 표면상태도 양호하기 때문이었다. 정극성 방전가공의 결과는 다른 문헌에 보고한 바 있다.^{13,14)} 방전에 사용한 인가전압은 40 V, 전류는 4.5, 7, 11, 15A, 듀티팩터는 0.24, 0.30, 0.45였다.

방전가공시 칩의 유출을 돕기 위하여 전극봉을 포함하는 헤드부가 상승 및 하강 작용을 반복하고, 하강 시간에 방전이 진행되고, 헤드부가 상승하는 동안 칩이 유출되는데, 이러한 상승/하강과 방전/휴지과정은 펄스관찰을 통하여 확인할 수 있었다. 방전가공중 인가전압 펄스는 내쇼날 인스트루먼트츠(National Instruments)사의 NI DAQ 보드와 랩뷰(LabVIEW) 프로그램을 이용하여 측정하였으며, 그 데이터를 컴퓨터에 저장한 뒤 분석하였다. Fig. 3은 이렇게 저장된 전압 펄스의 모습인데, (a)는 상승/하강이 반복될 때의 전압변화이고, (b)는 전극이 하강했을 때 일어나는 방전 펄스의 일부분으로 유도시간, 방전시간 및 휴지시간을 보여주고 있다.

방전가공을 실시한 후에 공작물의 무게를 0.1 mg 정밀도의 전자저울을 이용하여 측정하고 실행전 무게와 비교하여 공작물 제거속도를 계산하였다. 공작물 제거속도는 가공중 제거된 재료무게를 하강시간만으로 나누어 계산한, 실제 가공속도를 나타내는 값이다. 방전가공된 면에 대하여 표면거칠기측정장치(SurfTest-501, 미투도 요社)를 사용하여 표면거칠기를 측정하였는데, 각 시편당 동일 조건으로 2회 반복하여 최대 표면거칠기값을 측정한 뒤 평균값을 취하였다.

방전가공실시 전과 후의 시편에 대하여 육안 검사를 실시하고, 광학현미경 및 주사전자현미경(SEM) 분석을 행하였는데, 각 시편의 절단 연마한 단면, 파단면, 그리고 표면에 대하여 분석을 하였다. 가공전 시편의 미세구조분석을 위하여 절단·연마하고 흐르는 수소분위에서 섭씨 1400도, 30분간 열에칭을 하고 주사전자현미경 관찰을 하였다.

한국 산업규격 KS L1591-1994에 따라서 방전가공전 후의 Al₂O₃-33%TiC시편에 대한 4점 꺾임강도시험을 실행하였다. 경험있는 세라믹 가공업체에 의뢰하여 덩어

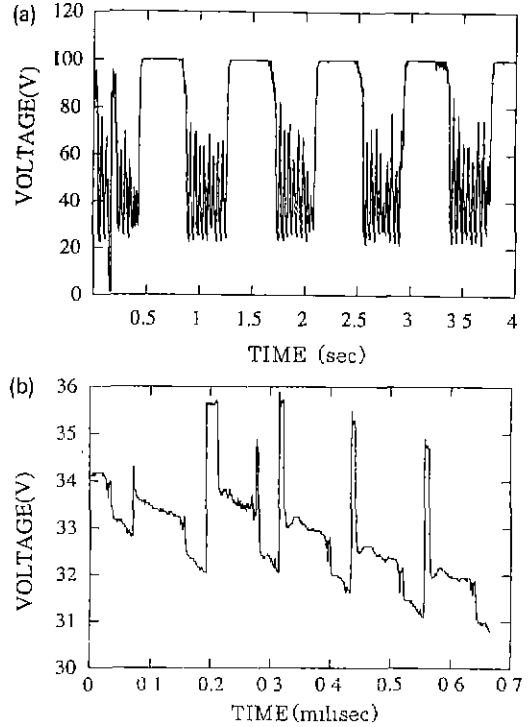


Fig. 3. Wave form of discharge voltage, (a) voltage change due to up/down of the head and (b) instant voltage change due to on/off of the discharge voltage.

리 시편을 절단, 연삭가공하여 3.0×4.0×36.0 mm³ 또는 3.3×4.0×36.0 mm³의 크기를 갖는 다수개의 시험편을 제작하였다. 연삭가공은 800번 거칠기까지의 숫돌로 실행하였고 모떼기를 하였으며, 더 이상의 연마는 하지 않았다. 이 중 3.3 mm 두께의 것은 한 면만 0.3 mm 두께만큼 방전가공을 하여 3.0 mm로 만들어 주고나서 4점 꺾임강도 시험을 하였다. 방전가공은 역극성으로 하였으며, 가공조건은 인가전류 4.5A, 듀티팩터 0.24이었고, 마지막에 슈퍼피니쉬 기능을 이용하여 마무리 가공을 하였다. 꺾임강도 시험할 때에는 방전면에 인장응력이 가해지도록 시편을 위치시켰다.

방전가공한 일부 시편은 다시 배럴연마를 하고 꺾임강도시험을 하였다. 배럴연마는 3 mm 직경의 규산알루미늄질 볼을 이용하여 100 rpm으로 24시간 동안 시행하였다. 24시간 배럴연마 후에는 방전가공한 면과 가공하지 않은 면의 구별을 할 수 없어서 배럴연마가 충분히 진행되었음을 알 수 있었다. 데이터는 와이불통계분석을 하여 와이불분포곡선을 그렸고 신뢰도로 사용되는 와이불계수를 최소자승법으로 결정하였다. 와이불분석에서 고장율(failure rate)은 중위순위(median rank)법

을 이용하여 계산하였다.

방전가공 과정에 대한 컴퓨터 모사분석을 갤러킨 방법으로 행하였다. 유도-방전-후지의 일련의 과정으로 발생하는 스파크 하나에 대하여 열의 유입과 유출에 대한 수치방정식을 정상상태를 가정하여 세우고 경계조건을 주어서 그 해를 구하여 스파크 주변 재료 내에서의 온도 분포를 구하였다. 본 연구에 사용된 모사분석방법에 대한 자세한 내용은 다른 문헌에 보고되어 있다.¹⁵⁾

4. 실험 결과

4.1. 방전가공성

Al₂O₃-TiC 세라믹 복합체 시편은 방전가공이 순조롭

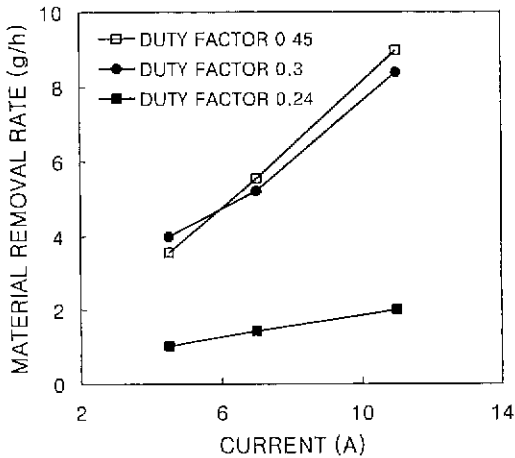


Fig. 4. Change of material removal rate with the change of current.

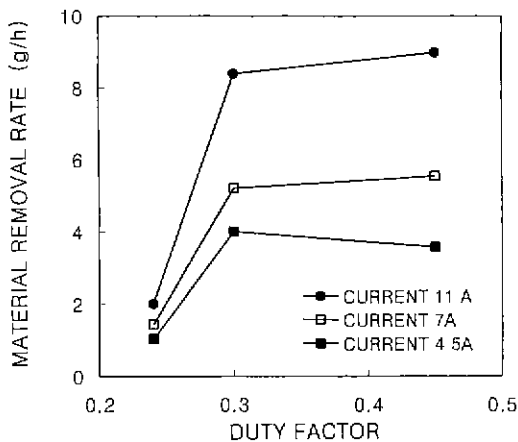


Fig. 5. Change of material removal rate with the change of duty factor.

게 진행되었고 최고 시간당 10.41 g의 공작물제거속도를 보이는 등, 가공속도도 상당한 것으로 나타났다. Fig. 4는 가공전류의 변화에 따른 공작물제거속도를 그래프로 나타낸 것인데, 전류량이 증가할수록 제거속도가 증가하는 모습을 보이고 있다. 이는 전류량 증가에 따라 방전에너지가 증가하게되고 방전스파크당 공작물제거량이 증가하기 때문으로 생각된다. Fig. 5는 듀티팩터의 변화에 따른 공작물제거속도를 나타낸 것인데, 듀티팩터의 증가에 따라 공작물제거속도가 초기에는 증가하다가 0.3 이상에서는 거의 증가하지 않는 모습을 보이고 있다. 듀티팩터는 온과 오프가 계속되는 펄스의 주기에 대한 실제 방전시간의 분율로서 이것이 증가하면 실제 방전시간이 늘어나게 되므로 펄스당 방전에너지가 증가하게되고 이에 따라 공작물제거속도가 증가하는 것으로 사료된다.

방전가공후 가공물의 표면거칠기는 Fig. 6에 보이는 것과 같이 전류나 듀티팩터가 증가함에 따라 증가하는

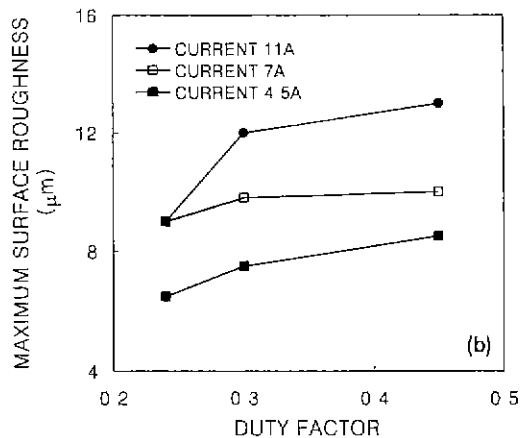
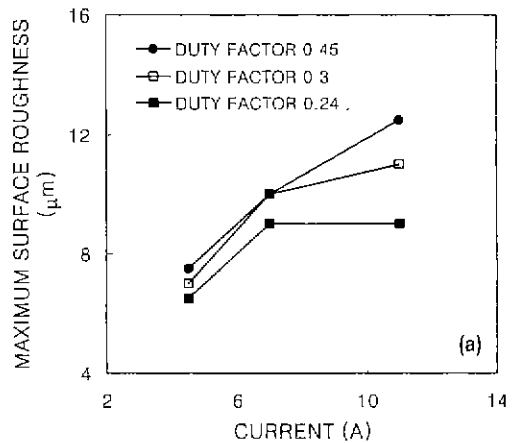


Fig. 6. Change of maximum surface roughness with the change of (a) current or (b) duty factor.

것으로 나타났는데, 표면거칠기가 증가하면 표면결함이 늘어나고 재료의 기계적 성질이 저하하게 되므로 바람직하지는 않다. 상기 결과들을 종합하면, 전류나 듀티팩터가 증가하면 가공속도는 빨라지나 표면이 거칠어지고, 전류나 듀티팩터가 감소하면 가공속도는 느려지나 표면이 좋아진다는 것이 된다. 이것은 전류와 듀티팩터를 초기에 높게 하고 마지막에 낮게 하여 가공한다면 빠른 가공속도와 좋은 표면을 함께 얻을 수 있다는 의미를 갖는다.

4.2. 미세구조 관찰

Fig. 7은 방전가공하지 않은 시편의 단면에 대한 전자현미경 사진으로 전체 입자의 크기가 1-2 μm 이고 등방성의 모습을 하고 있는 것을 보여주고 있다. 방전가공과정에 대한 모델링에 사용되는 스파크의 크기가 일반적으로 약 50 μm 정도이고¹⁶⁾ 관찰된 방전자극의 크기가 직경 100 μm 이상인 것을 고려하면, 방전 스파크의 쪽에서 볼 때, 시편은 거의 단일상, 또는 연속체로 간주해도 문제가 없을 것으로 사료된다.

Fig. 8은 방전가공 후의 시편 표면에 대한 전자현미경 사진으로, 약 100-200 μm 의 직경을 갖는 수많은 원형의 방전자극들이 중첩되어 있는 것을 알 수 있다. 이 방전자극들은 일반적으로 일정한 모습을 하고 있는데, 각 자극은 평평한 가운데부분, 거친 입자가 보이는 중간부분, 그리고 매끈한 둔덕이 진 가장자리부분의 세 부분으로 나뉘어져 있다. 이것을 더 확대하여 보면, Fig. 9에서 보듯이 표면에 녹아 흐른 자극과 1-3마이크론 크기의 입자들, 그리고 표면에 무수하게 뿜린 작은 구멍들이 관찰된다. 이들은 모두 시편표면에서 방전시 재료가 용융되었던 흔적을 보여주고 있다. 작은 입자들은 미용용 탄화티타늄으로 보이며 표면의 약 1-3마이크론 크기의 많은 구멍들은 높은 열로 용융물이 끓을 때 기체가 내부로부터

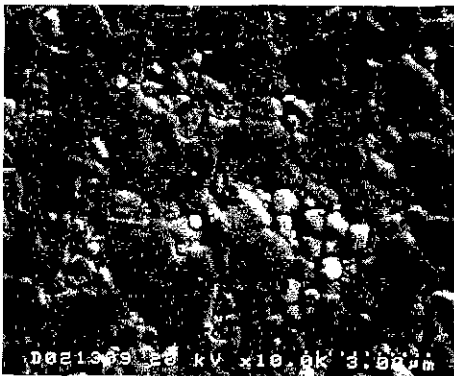


Fig. 7. Surface microstructure of the composite specimen before the EDM.

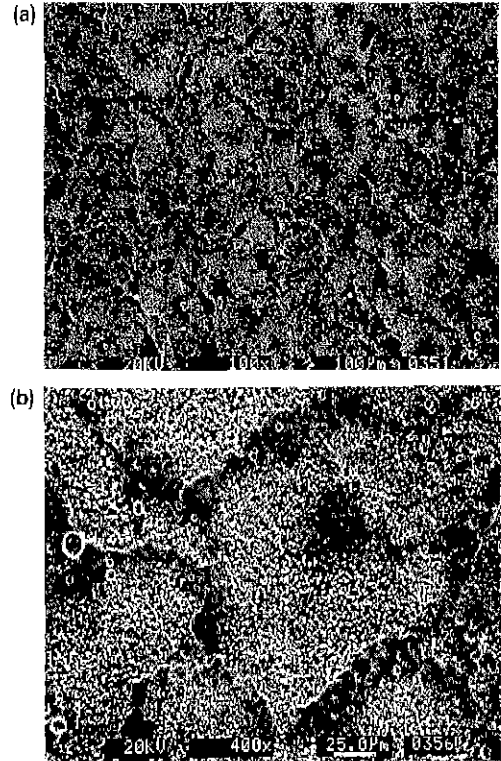


Fig. 8. SEM micrographs of craters on the EDMed surface with magnifications of (a) 100 and (b) 400 times.

발산되어 나온 자극으로 보인다. 복합체의 기질인 산화알루미늄의 용점이 섭씨 2050도인 점을 고려하면 방전시 표면의 온도가 섭씨 2000도를 훨씬 넘는 것으로 생각된다. 단면에 대한 전자현미경분석에서는 가공면 표면에 약 5마이크론 두께의 용융층이 존재하는 것이 관찰되었다.

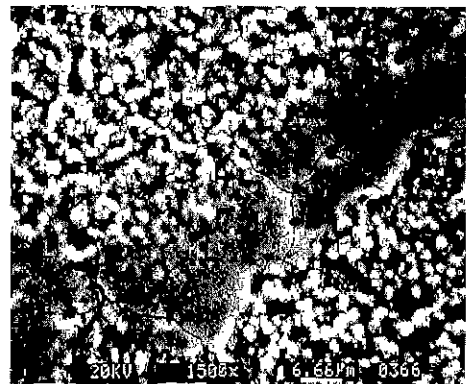


Fig. 9. SEM micrograph of craters on the EDMed surface with 1500X magnification.

가공시편 표면에 실금과 같은 균열이 보이는데, 이들은 방전시 재료 표면이 상온에서 수천도 고온으로 급열되고 방전직후 방전액에 의해 상온으로 급냉됨에 따라 시편부위간 열팽창변형의 차이로 인한 열응력 때문에 생긴 것으로 사료되나, 이들에 의해 재료가 떨어져 나간 모습은 보이지 않는다. 이상의 미세구조 관찰에서 재료표면에서 균열은 보이지만, 균열에 의해 재료가 제거된 흔적은 보이지 않는다는 점에서, 산화알루미늄-탄화티타늄 세라믹 복합체의 가공메카니즘은 페트로페스 등이⁷⁾ TiB₂ 세라믹에서 관찰한 바와 같은 열적 스포링 기구가 아닌, 용융증발기구로 분석이 된다. 이는 복합체의 기질을 이루는 산화알루미늄의 융점이 상대적으로 낮아서 용융됨으로써 단미 TiB₂의 경우처럼 열응력이 축적되지 않았던 때문으로 사료된다.

4.3. 기계적 성질

Al₂O₃-TiC 세라믹 복합재료의 4점 꺾임강도값이 방전 가공전에는 평균 567 MPa이었으나, 가공후에 측정된 값은 평균 318 MPa로 44% 감소한 것으로 나타났다. 이는 가공 후 표면거칠기가 최대 12마이크론까지 증가하는 등 표면결합의 크기가 증가하고 이것이 파괴시발점으로 작용한 때문일 것이다. 그러나, 4점꺾임강도 데이터에 대한 와이블 통계분석을 행한 결과, Fig. 10에서 보이는 바와 같이 재료의 신뢰도로 사용되는 와이블계수 값은 방전가공전 4.16에서 8.68로 2배 이상 증가한 것으로 나타났다. 이는 가공 후 재료표면의 거칠기가 가공전보다 더 균일하다는 것을 의미하는 것이며, 결국, 방전가공이 재료의 강도는 저하시키지만 그 신뢰도는 증가시

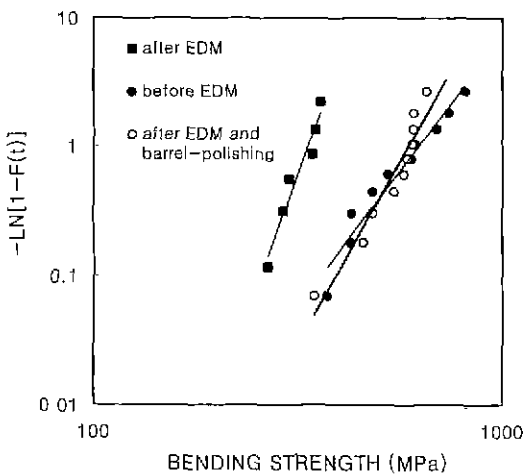


Fig. 10. The result of Weibull statistical analysis on the data of four-point bending strength of the composite samples before and after the EDM, and after EDM-barrel-polishing.

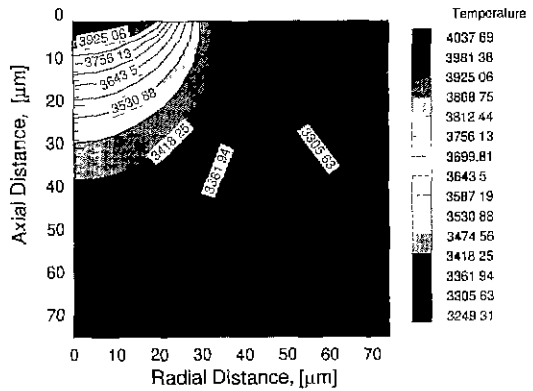


Fig. 11. The result of computer simulation showing the temperature profile in the sample near the spark.

킨다는 것을 알 수 있다.

방전가공 후 강도저하문제를 해결하는 한 방법으로 베릴연마를 시도하였다. 베릴연마는 피가공물을 구상 연마재 통에 넣고 회전시켜 가공하는 방법으로 연삭숫돌 등에 의한 기계연마보다 훨씬 저렴한 방법이다. 베릴연마를 24시간 행한 결과 4점꺾임강도값이 544 MPa로 증가하여 방전가공전 강도값이 거의 회복된 것으로 나타났다. 와이블계수는 베릴연마후 8.68에서 5.64로 감소하였으나 방전가공전과 비교할 때 그래도 약간 증가한 값을 나타내어 방전가공과 베릴연마를 복합적으로 적용할 경우 강도와 신뢰도가 모두 양호하다는 결과를 보이고 있다.

4.4. 유한요소분석

본 연구에서는 방전열량이 연속적으로 공급되는 정상상태 방전을 가정하여 해석을 하였는데, 해석결과, 연속적으로 공급되는 방전열속이 5.565×10^7 cal/sec m²인 경우 Fig. 11과 같은 모습의 온도분포를 하고 있는 것으로 나타났다. 정상상태를 가정하여 해석하였기 때문에, 해석된 분포온도값은 실제 온도와는 차이가 있으나, 그 등온선의 모습은 방전자극의 모습과 매우 유사한 것으로 나타났다. 만일, 실제상황에 근접한 비정상상태를 가정하여 해석한다면 실제온도에 보다 근접한 모사결과를 얻을 수 있을 것이다.

5. 결 론

도전성 탄화티타늄을 포함하는 산화알루미늄계 세라믹 복합체에 대한 방전가공을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이 복합체는 융점이 낮고 부도체인 산화알루미늄

과 용접이 높고 도전성이 있는 탄화티타늄, 두가지 물질로 이루어져 있지만, 시간당 10.41 g의 공작물 제거 속도를 나타내는 등, 방전가공이 가능한 것으로 확인되었다.

2. 방전조건인 전류가 증가할 때 가공속도는 증가하였으나, 가공후 시편의 표면거칠기는 나빠졌다. 또다른 방전조건인 듀티팩터가 증가할 때도 역시, 가공속도는 증가하였으나 가공후 시편의 표면거칠기는 나빠졌다. 이 결과는 빠른 가공속도를 원하는가, 아니면 좋은 표면을 원하는가에 따라서 가공조건을 달리하여 가공할 수 있다는 점을 보여주는 것이다.

3. 방전가공 후 시편 표면 및 단면에 대한 전자현미경 분석에서 시편표면은 100-200마이크론 직경의 원형 방전자극으로 덮혀있고 각 자극은 가운데, 중간, 테두리 부분의 세 부분으로 이루어진 독특한 일정한 모습을 하고 있었다. 시편의 단면관찰과정에서 약 5마이크론 두께의 표면 용융층이 관찰되었으며, 방전가공 메카니즘은 용융증발기구로 분석이 되었다.

4. 방전가공후 꺾임강도는 가공전에 비하여 약 44% 감소하였으나, 와이불계수는 2배 이상 증가하여 제품의 신뢰도는 대폭 향상되는 것으로 나타났다. 방전가공한 시편을 배렬연마한 경우에는 꺾임강도가 다시 회복이 되었다. 이 결과는 매우 간단하고 비용이 적게드는 연마방법인 배렬연마 과정을 방전가공 과정과 결합시킬 경우 강도저하없이 양호한 가공효과를 얻을 수 있다는 의미를 지닌다.

5. 유한요소분석을 행하여 시편내 온도분포도를 얻었으며, 등온선의 모양이 방전자극의 모양과 유사한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(신소재분야)에 의하여 연구되었음을 밝히며 교육부의 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 본 논문의 저자들은 기술적 협조를 아낌없이 제공해 준 경남대학교 대학원 우정윤 씨, 정영습 씨, 쌍용양회(주)의 김진영박사, 유명혁박사, 황보상일씨에게 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. S. Abrate and D. Walton, "Machining of Composite Materials, Part II: Non-Traditional Methods," *Composites Manuf.*, (2), 85-94 (1992).
2. *Nontraditional Machining Processes*, pp. 162-201, Edited by E. J. Weller, SME Publ., 1984.
3. D. Nierste, "EDM in New Places," *Cutting Tool Engineering*, April, 30-33 (1993).
4. 사전편집위원회 편, 화인세라믹스사전, 640쪽, 736-737쪽, 技報堂출판, 도쿄, 1987.
5. A. Gadalla, "EDMing Ceramics and Composites," *Cutting Tool Engineering*, **45**(3), 34-43 (1993).
6. M. Ramulu, H. W. See and D. H. Wang, "Machining of Ceramic Composite TiB₂/SiC by Spark Erosion," *Manuf Rev.*, **3**(2), 123-129 (1990).
7. N. Petrofes and A. Gadalla, "Electrical Discharge Machining of Advanced Ceramics," *Ceram. Bull.*, **67**(6), 1048-1052 (1988)
8. M. Ramulu, "EDM Sinkers Cutting of Ceramic Particulate Composite SiC-TiB₂," *Advanced Ceram. Mater.*, **3**(4), 324-327 (1988).
9. 윤병주, 김정두. "복합세라믹스(TiC-Al₂O₃)의 방전가공특성에 관한 연구," 한국공작기계기술학회지, **4**(4), 61-68 (1995).
10. M. Nakamura, I. Shigematsu, K. Kanayama, Y. Hirai, "Surface Damage in ZrB₂-Based Composite Ceramics Induced by Electro-Discharge Machining," *J. Mater. Sci.*, **26**, 6078-6082 (1991).
11. 유제구 편저, "방전가공," 대광서림, 서울 1994.
12. 김창호 편저, "방전가공," 기전연구사, 서울 1992.
13. 윤준도, 왕덕현, 안영철, "세라믹복합체의 방전가공성에 미치는 도전성 분산상의 영향," 95첨단공학(신소재분야) 연구보고서, 대한민국 교육부, 서울 1996.
14. 왕덕현, 우정윤, 윤준도, 고철호, 안영철, 정영습. "산화알루미늄-탄화티타늄(Al₂O₃-TiC) 세라믹 복합체의 방전가공," 경남대학교부설 신소재연구소 논문집, **7**, 191-202 (1996).
15. 안영철, 정영습, 왕덕현, 윤준도, "알루미나-탄화티타늄 복합체 방전가공의 수치해석," 화학공학의 이론과 응용, **3**(1), 1093-1095 (1997).
16. P. Madhu, V. K. Jain, T. Sundararajan and K. P. Rajorkar, "Analysis of EDM Process: A Finite Element Approach," *Computers in Engineering*, **2**, 121-127 (1991).