

탄화규소/알루미늄 금속계 복합재료의 형상방전기공

왕 덕 현*, 이 윤 경*, 우 정 윤**, 허 보 영***

Die Sinking Electrical Discharge Machining of SiC/Al Metal Matrix Composite

Duck-Hyun Wang*, Yun-Kyung Lee*, Jeong-Yun Woo**, Bo-Young Hur***

Abstract

Conductive metal matrix composite(MMC) material of 30% silicon carbide particulate based on aluminum matrix was machined by die sinking electrical discharge machining(EDM) process according to different current and duty factor for reverse polarity of electrode. Material removal rate(MRR) was examined by process under various operating conditions. The surface morphology was evaluated by surface roughness parameter and scanning electron microscopy(SEM) research. The MRR was suddenly increased over 11 ampere of current, and it was slightly changed over 0.3 of duty factor. The maximum surface roughness of EDMed surface was affected by the duty factor. The SEM photographs of EDMed surface showed wide recast distribution region of melting materials as increased of current and duty factor.

Keywords : Electrical Discharge Machining(방전기공), Metal Matrix Composite(금속계복합재료), Material Removal Rate(공작물체거울), Duty Factor(듀티팩터), Scanning Electron Microscopy(주사전자현미경)

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 가혹한 환경에도 견딜수 있는 소재들이 필요하게 되었으며, 두 가지 이상의 재료를 혼합하여 기계적 성질을 향상시킨 복합재료중 중합체계 복합재료가 산업 전반에 걸쳐 연구되어 사용빈도가 급속히 증가

되고 있다. 또한 세라믹계 및 금속계 복합재료도 미국의 항공우주국, 국방성산하 연구소에서 연구가 진행되어 실용화 단계에 있다. 특히 우주항공분야에서는 무엇보다도 가볍고 그리고 다른 기계적 특성을 갖는 복합재료들에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 점차로 실용화되어 이제는 자동차, 스포츠 및 전자부품산업 등에서 기존의 소재들과 대체되

* 경남대학교 기계공학부

** 경남대학교 대학원 기계공학과

*** 경상대학교 금속재료공학과

고 있다. 중합체계 복합재료에 관한 연구는 활발히 이루어지고 있으나, 가벼운 기지재료인 알루미늄(Al)에 내마멸성을 향상시킨 금속수지 복합재료에 관한 연구는 많지 않다⁽¹⁻²⁾.

이들 복합재료는 비강성, 비강도 및 내마멸성 등이 높아 기존의 가공방식으로는 공구의 급속한 마멸, 손상영역 등의 발생으로 어려움이 많아, 이 현상을 극복하기 위하여 일반가공 방식으로는 CC(Cemented Carbide), PCD(Polycrystalline Diamond) 및 SPDT(Single Point Diamond Tool) 등의 내마멸성이 높은 공구를 사용하는 방법이 있으며, 또한 특수가공방식인 초음파가공(Ultrasonic Machining), 방전가공(Electrical Discharge Machining) 등을 사용할 수 있다. 특히 방전가공은 전기전도성이 있는 재료의 빠른 가공과 복잡한 형상의 가공이 가능한 방법이다⁽³⁾.

금속계 복합재료의 방전가공성에 관한 연구로, Tomac⁽⁴⁾는 공구의 심한 마멸, 절삭력, 표면거칠기 및 칩형태 등에 관하여 연구를 하였으며, Yuan⁽⁵⁾ 등은 SPDT공구를 사용하여 복합재료의 초정밀가공에 대해 연구를 하였다. 그리고 Weinert⁽⁶⁾는 절삭공구의 플랭크마멸 메커니즘에 관한 연구를 하였는데, 복합재료의 강화재 입자의 크기와 절삭공구 조직의 크기에 많은 영향을 받는다고 하였다. 한편 세라믹계 복합재료의 방전가공 실험에 의한 가공성 평가로 Petrofes⁽⁷⁾는 표면거칠기를 측정하였으며, 특히 가공속도가 증가할수록 크레이터의 체적이 크고 표면거칠기 상태가 나빠진다는 것을 알았다. Ramulu⁽⁸⁾ 등은 abrasive waterjet가공과 방전가공 방법으로 세라믹계 복합재료인 TiB₂/SiC의 가공성 연구를 시도하였다.

탄화규소를 강화재로 사용한 금속계 복합재료의 구멍형상가공으로 드릴가공을 실험한 경우 재료의 취성 때문에 밀면에 파괴가 발생하였다. 본 연구에서는 특수가공방식인 방전가공을 이용하여 탄화규소 입자가 30% 함유된 알루미늄기지 금속계 복합재료의 형상가공 실험을 행하여 그에 따른 특성을 파악하고, 또한 방전조건의 변화에 따른 공작물제거율, 표면거칠기 및 전자현미경에 의한 소재의 미세구조 변화를 통하여 가공성을 규명하고자 한다.

2. 방전가공 원리

방전가공은 전극봉(Electrode)과 전기전도성이 있는 피삭재 사이에 일반적으로 10⁻⁷~10⁻³초 동안 순간적으로 스파크방전을 발생시켜 높은 열이 피삭재에 국부적으로

작용하여 가공하는 방법이다. 방전가공방법에는 임의의 모양을 형상 가공할 수 있는 다이싱킹 방전가공과 금형제작 등에 많이 사용되는 와이어컷 방전가공이 있다. 방전가공이 발생하는 과정은 코로나방전에서 시작되어 불꽃방전, 아아크방전 형태를 통하여 피삭재를 절연 파괴시키는 과정으로 연속적으로 이 현상의 방전이 발생한다. 이러한 과정으로 가열작용과 충격력 때문에 순간적으로 생기는 열로 인해 주변의 방전액은 기화상태로 되고, 피삭재는 용융층과 증발층이 생기면서 국부적으로 가공이 발생한다. Fig. 1은 전극봉을 양극으로 하고 피삭재를 음극으로한 역극성(Reverse polarity)인 조건으로 방전가공이 발생하는 현상을 모식도로 나타낸 것이다.

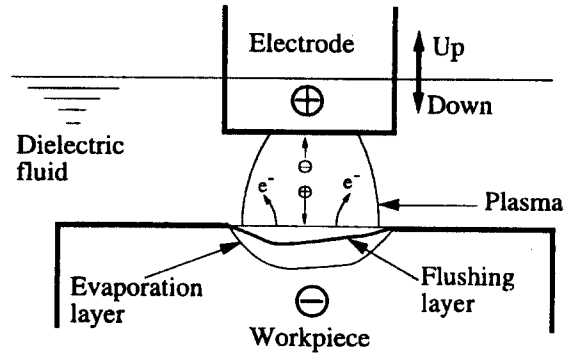


Fig. 1 Electrical discharge machining process

방전가공에 의하여 제거되는 피삭재의 부피는 방전에너지와 밀접한 관계가 있으며, 이 때 방전에너지(E)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 V는 방전시 간극전압이고, I는 방전전류, t는 방전전류가 흐르는 시간이다. 방전가공에 의하여 공작물제거율에 영향을 미치는 인자로 전류가 가장 크게 작용하고, 그 다음은 방전시간으로서 전체 시간에 대한 실제 방전이 작용하는 시간의 비인 듀티팩터로서 영향을 미치게 된다. 즉 Fig. 2에 나타낸 것처럼 듀티팩터는 방전유도시간(τ_u), 방전시간(τ_{on}) 및 휴지시간(τ_{off})의 합인 총합의 시간에 대한 실제 방전시간의 비율로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

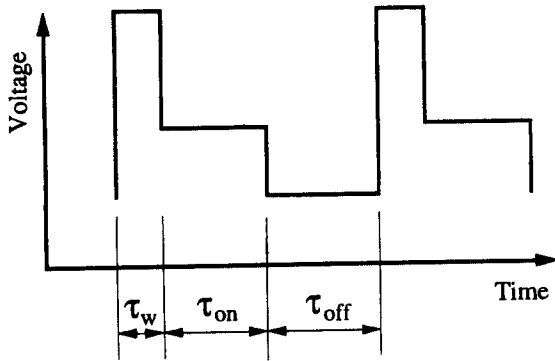


Fig. 2 Instant voltage change due to on/off time

3. 실험방법 및 실험장치

본 실험에서는 Fig. 3에 나타난 것처럼 헤드 부분, 전극봉홀더, 작업탱크, 베드 및 조절판 등으로 구성되어 있는 다이싱킹 형상방전기 SERVO III(JungKwang Company)를 사용하였다. 방전가공은 피삭재를 테이블에 적으로 고정시키고 방전유에 완전히 잠기게 하며, 전극봉을 헤드부분의 공기홀더에 설치하여 유압제어식으로 상승/하강방향으로 이동시켜서, 방전조건들인 전류와 방전시간 및 휴지시간을 변화시키면서 실험을 실행하였다. 방전시간 및 휴지시간의 변화를 나타내는 듀티팩터와 전류의 인자로 전

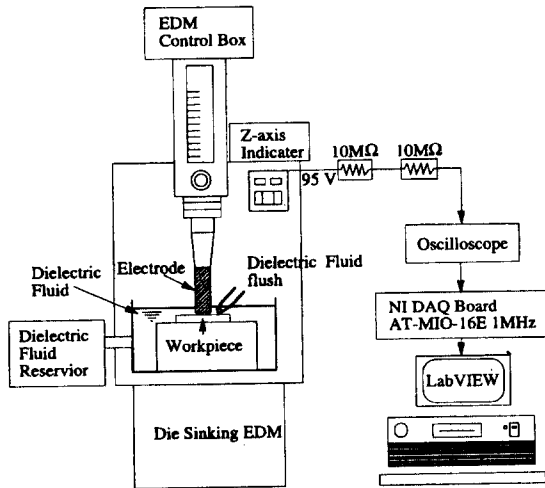


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

압신호의 변화를 A/D 변환기를 통해 PC에 저장하고 데이터를 행렬로 변환하여 분석하였다.

방전가공기의 헤드부분이 상승/하강방향으로 이동하며, 하강방향 이동시 Fig. 2에 나타난 것처럼 방전(τ_{on})과 휴지(τ_{off})가 수십에서 수백번 반복하면서 방전이 발생하고, 상승방향으로 이동하면서 방전이 중단되고 칩이 배출된다. 이 때 발생하는 전압신호와 또한 실제 방전이 반복되는 과정중 방전시간 및 휴지시간 동안 발생하는 전압은 100V에서 40V로 너무 높은 값으로 순간적으로 변화하므로 직접 연결에 의한 측정은 불가능하고, 전압을 낮출 수 있는 Tektronix사의 6ft 10M Ω 단자 2개를 연결하여 전압을 5V 이내로 낮춘 후 National Instruments사의 NI DAQ Board와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 측정하여 데이터를 컴퓨터에 저장하였다.

전류의 변화를 4.5A(암페어), 7A, 11A 및 15A로 하였으며, 휴지단계를 5단계로 일정하게 하고 방전단계를 1단계, 3단계 및 5단계로 변화시키면서 실험을 진행하였다. 방전가공을 실행한 후에 피삭재의 무게를 10⁻⁴g 정밀도의 전자직시천칭을 이용하여 측정하여 가공전 상태와 비교하여, 공작물제거율(Material Removal Rate, MRR)을 계산하였으며, 공작물제거율은 헤드부분이 상승하는 시간을 제외한 실제 방전과 휴지시간이 존재하는 하강시간동안 계산을 하였다. 방전가공된 표면의 표면거칠기 상태를 Surf-test-501(Mitutoyu, Japan)을 사용하여 동일 조건으로 반복 측정하였으며, 또한 전자현미경으로 방전가공된 면의 상태를 관찰하였다.

실험에 사용된 피삭재 무게는 약15g이고, 크기가 60x20x10mm인 SiC/Al 금속계 복합재료로 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다. 전극봉은 직경 20mm로 Table 2에 나타낸 조성과 성질의 구리를 사용하였으며, 방전이 발생하는 면을 4x18mm의 직사각형 모양으로 만들었으며, 가공깊이는 동일 간격으로 0.3mm까지 방전 조건의 변화에 따라 가공실험을 진행하였다.

Table 1 Chemical composition of SiC/Al metal matrix composite

Metal base (%)							Ceramic fiber (%)
Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn	Al	SiC (particle)
12.5	1.1	0.9	1.57	0.8	0.1	base	30

Table 2 Chemical composition and properties of Cu electrode

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

4. 실험결과 및 고찰

방전의 휴지단계를 5단계로 고정하고 방전단계를 1단계, 3단계 및 5단계로 변화시키면서 A/D변환기로 측정된 전압신호를 식(2)에서 나타난 듀티팩터 값들로 구하였으며, 그 값들은 방전/휴지단계에 따라 다르며 전류의 상태에는 관계없이 거의 일정하게 나타났다. 방전상태가 1단계, 3단계 및 5단계인 경우 신호의 방전유도시간, 방전시간 및 휴지시간을 Table 3에 나타냈으며, 각각의 듀티팩터 값들은 0.24, 0.30 및 0.45로, 듀티팩터가 0.24와 0.30인 경우 방전시간이 0.048ms와 0.059ms로 차이가 많이 생기지 않지만, 듀티팩터가 0.45인 경우 0.130ms로 방전휴지시간과 거의 같으며 상대적으로 실제 방전시간이 크게 나타나고 있다.

Table 3 Duty factor for different EDM conditions

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

방전이 중단되고 칩방출이 진행되는 상승시간을 제외한 실제 방전이 연속적으로 발생하는 시간동안 피삭재 무게의 변화량을 공작물제거율(Material removal rate, MRR)로 나타내고 있는데 Fig. 4와 Fig. 5는 각각 인가전류 및 듀티팩터의 변화에 따른 공작물제거율로 나타난 것이다. Fig. 4는 전류가 공작물제거율에 미치는 영향을 나타내고 있으며, 인가전류가 4.5암페어에서 11암페어까지 전류가 증가함에 따라 공작물제거율도 조금씩 증가하나, 인가전류가 15암페어에서는 급속한 증가를 나타내고

있다. 듀티팩터의 영향은 Fig. 5에 나타내고 있으며, 듀티팩터 값이 0.24에서 0.30으로 증가함에 따라 공작물제거율도 증가하는 경향을 보여주고 있으나, 듀티팩터가 0.45인 경우 큰 차이가 발생하지 않았다. 이것은 방전시간이 0.130ms로 충분히 증가하였지만 휴지시간이 0.134ms로 상대적으로 칩이 배출될 수 있는 충분한 휴지시간이 주어지지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 인가전류가 11암페어에서는 공작물제거율이 급속히 증가하고 있는데 이것은 탄화규소/알루미늄 복합재료를 완전히 용융할 수 있는 상태인 것으로 사료된다.

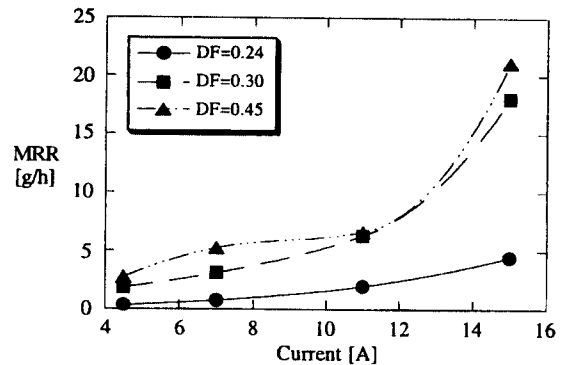


Fig. 4 Material removal rate vs. current

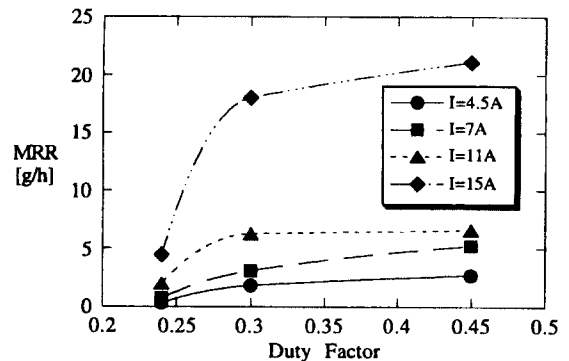


Fig. 5 Material removal rate vs. duty factor

Fig. 6(a)는 인가전류가 4.5암페어이고 듀티팩터가 0.24인 경우 측정된 표면거칠기곡선을 나타낸 것이며, Fig. 6(b)는 인가전류가 7암페어이고 듀티팩터가 0.45인 경우이다. Fig. 6(a)인 경우 중심선평균거칠기(Ra)는 0.27 μ m이고, 최대표면거칠기(Ry)는 19.2 μ m이다. 또한 Fig. 6(b)는 4.5 μ m의 중심선평균거칠기와 35.6 μ m의 최대표면거칠기를 나타낸 것이다. 인가전류와 듀티팩터가 증가

할수록 공작물제거율은 증가하지만, 방전에너지의 증가에 따라 용융/재융착과정으로 표면거칠기가 깊은 산과 골짜기를 형성하여 나빠지고 있다

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 인가전류와 듀티팩터의 변화에 따른 최대표면거칠기를 나타낸 것이다. Fig. 7은 인가전류의 변화에 따른 최대표면거칠기 값을 나타낸 것으로, 인가전류가 4.5암페어의 낮은 값에서 전류가 7암페어로 증가함에 따라 급속히 나빠지나, 그후로 11암페어 및 15암페어로 증가된 경우 표면거칠기 변화는 완만하다. Fig. 8은 듀티팩터의 변화에 따른 최대표면거칠기를 나타낸 것으로, 대체적으로 듀티팩터가 증가함에 따라 거칠기가 점차적으로 나빠지고 있다는 것을 확인할 수 있다.

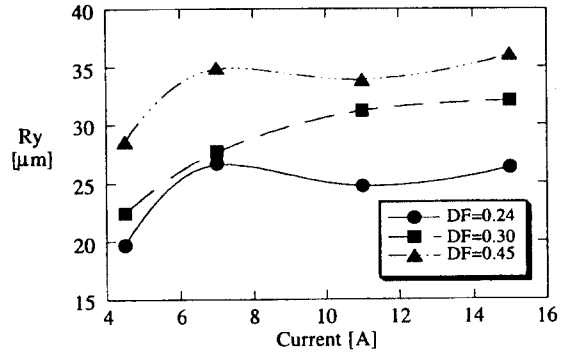
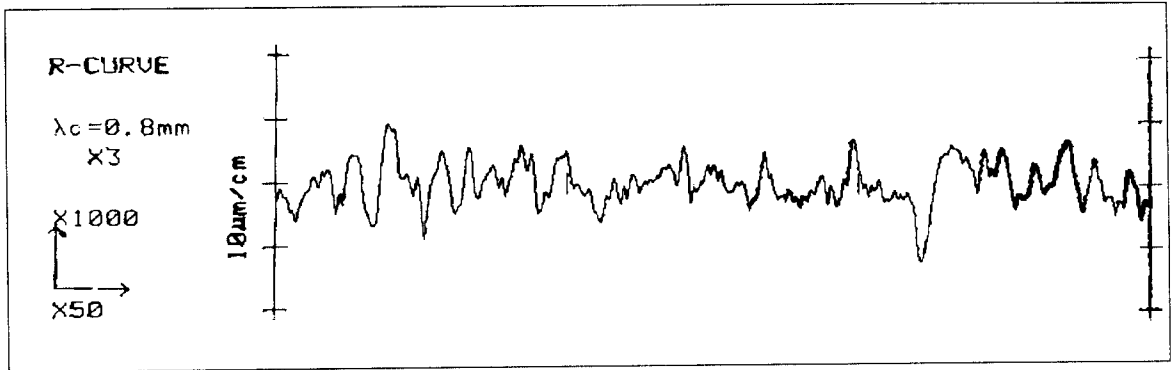
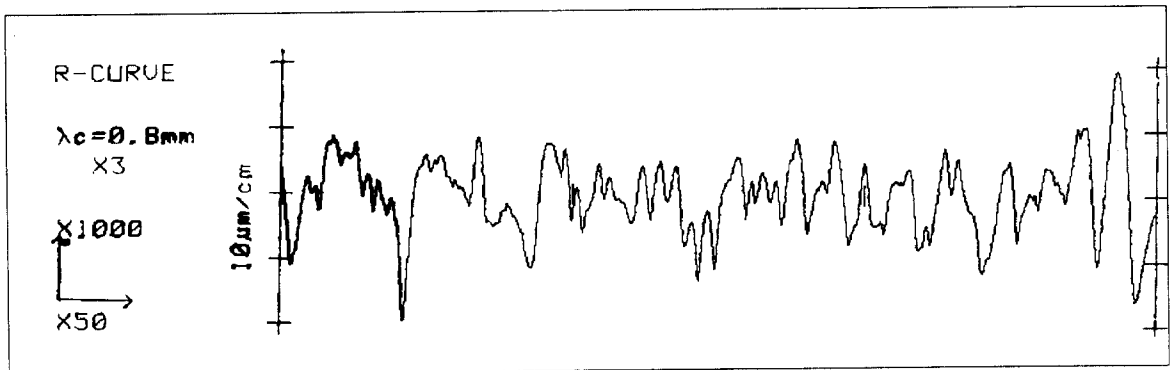


Fig. 7 Maximum surface roughness vs. current



(a) Current 4.5A, duty factor 0.24



(b) Current 7A, duty factor 0.45

Fig. 6 Typical surface profiles of EDMed surface

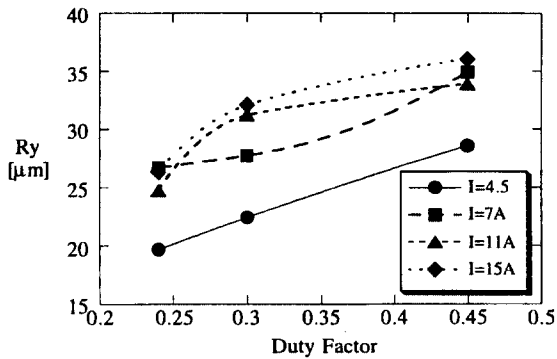
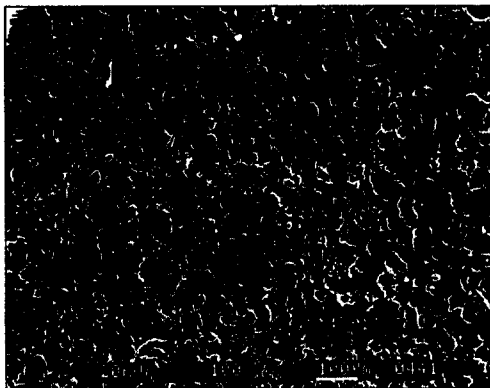
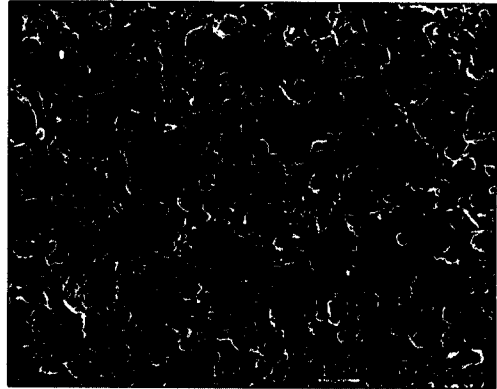


Fig. 8 Maximum surface roughness vs. duty factor

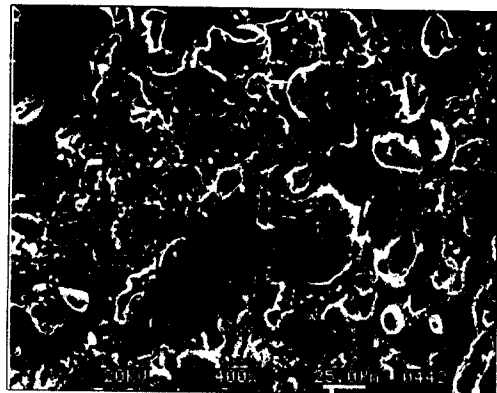
Fig. 9는 방전가공된 면을 주사전자현미경으로 관찰한 것을 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 인가전류가 4.5암페어이고 듀티팩터가 0.24인 경우 100배의 사진이고 Fig. 9(b)는 전류가 7암페어이고 듀티팩터가 0.45로 모두 증가한 경우이다. 두 가지 모두 방전가공에 의하여 피삭재가 용융후 재응착과정을 나타내고 있으며, Fig. 9(a)처럼 인가전류 및 듀티팩터가 낮은 경우 작은 모양의 용융 재응착과정을 나타내고 있으나, Fig. 9(b)에 나타난 것처럼 방전조건들이 모두 증가함에 따라 용융 재응착과정에서 상대적으로 큰 포켓(pocket)구멍을 갖고있어 표면거칠기가 나빠지는 것으로 사료된다. Fig. 9(c)와 9(d)는 각각 Fig. 9(a) 및 Fig. 9(b)의 표면중 일부를 400배 배율로 증가하여 관찰한 것으로, 방전가공이 진행됨에 따라 용융 및 재응착된 것을 나타내고 있으며, 인가전류와 듀티팩터가 증가함에 따라 방전에너지가 증가하여 깊고 큰 포켓구멍들이 표면에 형성되는 것으로 사료된다.



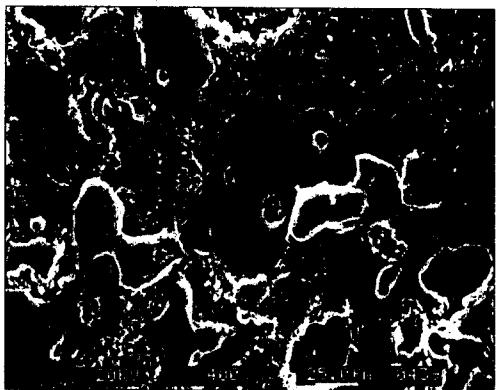
(a) Current 4.5A, duty factor 0.24, magnification 100X



(b) Current 7A, duty factor 0.45, magnification 100X



(c) Current 4.5A, duty factor 0.24, magnification 400X



(d) Current 7A, duty factor 0.45, magnification 400X

Fig. 9 SEM photographs of EDMed surface

5. 결 론

본 연구에서는 다이싱킹형상방전가공기에 의하여 탄화 규소 입자가 30% 함유된 알루미늄기지 금속계 복합재료의 방전가공실험을 행하여 방전조건의 변화에 따른 공작물제거율, 표면거칠기 및 전자현미경에 의한 소재의 미세구조 변화를 파악하여 가공 특성을 규명하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 인가전류와 듀티팩터 모두 공작물제거율에 영향을 미치며, 본 실험에 사용한 SiC/Al 금속계 복합재료에서는 인가전류가 15암페어 이상에서는 모두 용융되어 공작물제거율이 급속도로 증가하나, 듀티팩터가 0.30에서 0.45로 증가됨에 따라 방전시간에 대한 상대적인 휴지시간이 충분하지 않아 큰 변화가 없게 나타난다.
2. 최대표면거칠기는 전류가 4.5암페어에서는 낮은 값을 나타내고 있으며, 전류가 증가함에 따라 최대표면거칠기는 급속히 거칠어지고 있으나, 그 이상의 전류에서는 완만한 변화를 나타내고 있다. 또한 듀티팩터가 증가함에 따라 최대표면거칠기는 증가하는 경향을 나타내고 있다.
3. 방전가공면의 주사전자현미경 관찰에 의하여 방전가공은 용융 재융착의 과정을 나타내며, 이 과정에서 인가전류 및 듀티팩터의 증가에 따라 크기가 큰 용융 재융착 모습을 나타내고 또한 크고 깊은 포켓형상 구멍을 형성하여 표면상태를 불량하게 만든다.

후 기

본 연구는 1995년도 경남대학교 부설연구소 학술연구조성비에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. T. W. Clyne, J. F. Manson, "The Squeeze Infiltration Process for Fabrication of Metal Matrix Composites," Metallurgical Transaction A, Vol. 18A, pp. 1519-1530, 1987.
2. A. Mortesen, J. A. Comie, "On the Infiltration of Metal Matrix Composites," Metallurgical Transaction A, Vol. 18A, pp. 1160-1163, 1987.
3. M. Ramulu, "EDM Sinker Cutting of Ceramic Particulate Composite SiC-TiB₂," Advanced Ceramic Materials, Vol. 3, No. 4, pp. 324-327, 1988.
4. N. Tomac, K. Tonnessen, "Machinability of Particulate Aluminium Matrix Composites," Annals of the CIRP, Vol. 41, No. 1, pp. 55-58, 1992.
5. Z. J. Yuan, L. Geng and S. Dong, "Ultraprecision Machining of SiCw/Al Composites," Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 107-109, 1993.
6. K. Weinert, W. Konig, "A Consideration of Tool Wear Mechanism when Machining Metal Matrix Composites(MMC)," Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp. 95-98, 1993.
7. N. Petrofes, A. Gadalla, "Electrical Discharge Machining of Advanced Ceramics," Ceramic Bulletin, Vol. 67, No. 6, pp. 1048-1052, 1988.
8. M. Ramulu, H. W. See and D. H. Wang, "Machining of Ceramic Composites TiB₂/SiC by Spark Erosion," Manufacturing Review, Vol. 3, No. 2, pp. 123-129, 1990.