

# 전극봉내 방전유 분사시스템에 의한 형조방전가공

왕덕현\*, 우정윤\*\*

## Die-sinking Electrical Discharge Machining with Dielectric Fluid Ejection System through the Inside of the Electrode

Duck Hyun Wang\*, Jung Yun Woo\*\*

### Abstract

Experimental study of die-sinking electrical discharge machining(EDM) was conducted with rotating electrode system including inside hole for increasing the material removal rate(MRR). With the help of dielectric fluid flow through the inside according to the different internal diameter of the hole, the molten workpiece debris could be removed and flushed out during the EDM. Cold die alloy(SKD-11) was executed for different peak current and duty factor. From this study, the MRR was found to be increased with the peak current. The more MRR was obtained for the case of electrode inside diameter of 10mm, but the MRR was decreased as the diameter near at the 4mm and 6mm. The values of surface roughness and roundness were analyzed under various conditions, and these were affected by the inside diameter change of electrode.

**Key Words :** Die-sinking EDM(형조방전가공), MRR(공작물제거속도), DF(듀티팩터),  $R_{max}$ (최대높이거칠기), Cold die alloy(냉간금형용 합금강), SEM(주사전자현미경)

## 1. 서론

생산기반기술인 금형산업의 발달로 높은 생산성을 가져 오게 되었으며 또한 기계부품의 정밀도 향상을 요구하게 되었다. 금형가공부품의 경쟁력을 향상시키기 위하여 난삭성 금형용 소재의 고정밀 및 고능률 가공에 관련된 연구가 절실히 필요하게 되었다. 냉간금형용 합금강(SKD-11)은 담금질성이 좋아 공냉으로도 충분한 경도를 얻을

수 있으며, 열처리변형이 적고, 또한 기계적 성질이 우수하여 냉간성형용 다이, 자동차, 전자부품산업, 엔진 및 열교환기용 등 다양한 용도의 부품으로 사용되고 있다. 난삭재인 냉간금형용 합금강은 각종 기기의 부품으로 사용되나, 제조시 발생하는 수축 등의 변형과 치수오차들이 생기는데, 이와 같은 오차를 제거하기 위해서 특수가공방법인 형조방전가공이 필요하다.<sup>(1)</sup>

방전가공에 관련된 연구로 Mohri 등<sup>(2)</sup>은 복합재료 전극

\* 경남대학교 기계자동화공학부  
\*\* 경남대학교 대학원 기계공학과  
(dhwang@kyungnam.ac.kr)

봉을 이용한 경우 피삭재의 표면형상과 크랙, 부식저항 등을 수행하였다. 가공시간에 따른 피삭재와 전극봉의 형상 변화를 기하학적인 방법을 제시하였고, 또한 방전가공시 공구로 사용된 전극봉을 3부분의 마멸영역으로 구분한 연구를 하였다.<sup>(34)</sup> Kunieda 등<sup>(5)</sup>은 얇은 파이프형 전극봉을 사용하여 방전가공성을 비교하였으며, 가공중 발생하는 칩의 입자크기 및 온도분포를 연구하였다. 그리고 Koshy<sup>(6)</sup>는 방전유류의 속도분포를 모델링하였으며, 기존의 방법과 회전전극봉을 이용한 방전가공을 통해서 공작물 제거속도 및 표면상태를 나타내었다.

본 연구를 위하여 형조방전가공기의 공작물제거속도를 향상시키기 위하여, 기존 방법에 전극봉에 구멍형상을 만들고 그 구멍 크기를 변화시키면서 구멍 속으로 방전유를 분사시키는 시스템을 제작하였다. 이 방전유 분사시스템으로 난삭재인 고탄소-고크롬 공구강(SKD-11, HRC15)을 형조 방전가공 실험을 수행하여 공작물제거속도, 최대높이거칠기, 진원도와 가공면의 미세조직을 분석 연구하여 분사시스템에 의한 가공특성을 규명하고자 하였다.

## 2. 형조방전가공 및 표면거칠기

방전가공은 전극봉이 피삭재와 25 $\mu$ m 정도의 최적의 일정한 간극을 유지하면서 스파크 방전을 발생시켜 그 열로 국부적으로 소재를 가공하는 방법이다.<sup>(7)</sup> 방전가공시 발생하는 전압신호 분석으로 식(1)에 나타난 것처럼 한 사이클 중에 방전시간이 실제가공에 기여하고있는 시간비율인 듀티팩터(DF)를 구할 수 있으며, 이 듀티팩터는 방전유도시간( $\tau_w$ ), 방전시간( $\tau_{on}$ ) 및 방전휴지시간( $\tau_{off}$ )으로 이루어진다. 본 실험에서 측정된 듀티팩터 값들을 Table 1에 나타내고 있으며, 본 실험에서 방전가공조건으로 사용하였다.

$$DF = \frac{\tau_{on}}{\tau_w + \tau_{on} + \tau_{off}} \quad (1)$$

Table 1 Duty factor for EDM conditions

DF \ Pulse	0.24	0.3	0.45
$\tau_w$ ( $\mu$ s)	0	7	24
$\tau_{on}$ ( $\mu$ s)	48	59	130
$\tau_{off}$ ( $\mu$ s)	152	129	134

방전가공면이나 전극봉은 열적손상 영역을 포함하고 있으며 표면 형상이 일정하지 않아 중심선평균거칠기( $R_a$ )보다는 최대높이거칠기( $R_{max}$ )로 표면상태를 표현하는 것이 바람직하다. 최대높이거칠기는 단면 곡선에서 기준길이를 채취하여 그 부분의 가장 높은 산부분과 가장 깊은 골부분의 차를 단면 곡선의 중 배율의 방향으로 측정하여 그 값을  $\mu$ m으로 나타낸 것이며, 기준길이(cutoff value)는 0.8mm를 주로 사용한다.

## 3. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 피삭재인 고탄소-고크롬강 공구를 방전유에 완전히 잠기게 하고, 전극봉의 내경이 서로 다른 전극봉을 사용하여 그 속으로 방전유를 분사시키으로써 방전가공시 발생하는 칩을 제거할 뿐만 아니라 피삭재의 열적 영향을 줄여 냉각효과를 높이도록 방전유 분사시스템을 제작하였으며, 본 실험에 사용된 실험장치의 도식적 개략도와 형조방전가공기 SERVO III를 Fig. 1에서 나타내었다.

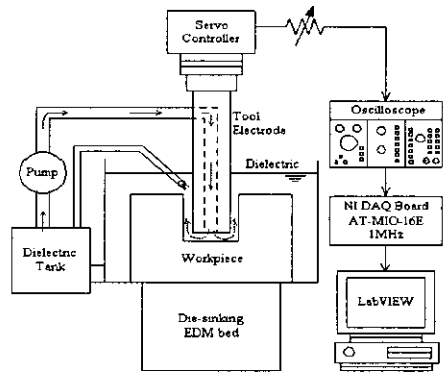


Fig. 1 Schematic experimental setup diagram

형조방전가공기는 헤드부분, 작업탱크, 베드 및 조절판으로 크게 4부분으로 구분하며, 전극봉은 헤드부분에 설치되어 있는 전극봉 홀더에 고정시키고, 유압제어식으로 상하 이동에 의해 전극봉과 피삭재의 간극이 수십 마이크로미터를 유지하면서 가공이 이루어진다. 또한 실험에 사용된 실험장치와 가공조건들을 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

Table 2 Experimental equipments

Item	Model	Company
Die-sinking EDM	SERVO III	Jung Kwang
Electronic balance	B120S	Basic
Ultrasonic cleaner	2210	Branson
Roundness tester	RA-116D	Mitutoyo
Surface roughness tester	Surftest-501	Mitutoyo

Table 3 Machining conditions

Polarity	Copper(-)
Discharge peak current [A]	11, 15, 19
Pulse duration [ $\mu$ s]	48, 59, 130
Discharge voltage [V]	30
Open circuit voltage [V]	100
Machining depth [mm]	Through cut

Fig. 2는 본 실험에 사용되는 전극봉으로 직경  $\phi$  20mm 인 구리를 원형가공하여 직경  $\phi$  12mm의 솔리드상태와 방전유를 전극봉내로 주입시킬 수 있는 직경  $\phi$  4mm에서  $\phi$  10mm까지 2mm간격의 4종류의 파이프형으로 제작하였으며, 전극봉 홀더에 고정시키기 위하여 전극봉의 끝부분에 m20\*p2.5인 나사로 가공하였다.

솔리드(0mm)상태일 경우 외부의 3개의 노즐을 사용하여 방전유를 분사하였고, 파이프형일 때는 노즐과 전극봉 내의 구멍속으로 방전유를 분사시키면서 가공을 하였으며, 이렇게 사용된 전극봉의 화학적 성분은 Table 4에 나타난 것과 같다.

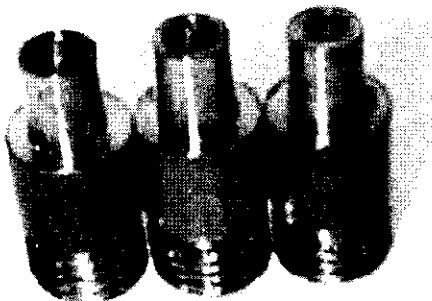


Fig. 2 Shape of copper electrode

Table 4 Composition and properties of copper electrode

Chemical composition(%)		Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Conductivity
Cu	Cr,Ti,Zr	25	15	102
99.9	small			

방전가공시 피삭재면의 정밀도를 높이기 위하여 샌드페이퍼 2000번을 사용하여 전극봉의 가공면을 연마한 뒤 다시 입자 3000번의 알루미늄분말로 전극봉을 수십번 연마한 후 실험을 하였다. 피삭재는 고탄소-고크롬 공구강(STD-11)인 난삭재를 사용하였으며, 가공깊이는 피삭재 두께 5mm인 시편을 완전히 관통시키는 상태로 가공을 수행하였다. 인가피크전류와 듀티팩터의 가공조건들을 변화시키면서 가공특성을 파악하였으며, 또한 방전 및 휴지 시간동안 전압의 변화를 측정하기 위하여 가변저항기를 설치하여 오실로스코프로 전압파형을 검출하였고, National Instruments 사(USA)의 DAQ Board와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 전압변화 데이터를 PC에 저장하여 분석하였다.

공작물제거속도(MRR)는 가공후에 피삭재 무게를 10<sup>-4</sup>g의 전자저울을 사용하여 측정하였으며, 실제 가공된 면의 표면상태는 10분 가량 초음파로써 세척한 후 표면 거칠기 측정기를 사용하여 90도 방향으로 4회 측정된 값들의 평균값으로 최대높이거칠기를 나타내었다. 방전가공된 실제구멍의 진원도 측정은, 회전수 6rpm이고 최대 적재질량은 20kg까지 가능하며 센터링과 레벨링은 각각  $\pm$  3mm와  $\pm$  1°의 조정범위를 갖고 있는 진원도 측정장치를 사용하였으며, 진원도 해석은 최소자승법으로 가우션 필터를 이용하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 검출된 전압파형으로 방전 및 휴지시간동안 측정된 전압의 변화를 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 샘플링 시간이 5000Hz로 헤드부가 상/하이동하는 동안 전압의 변화주기를 나타낸 것이고, Fig. 3(b)는 샘플링 시간을 0.9MHz로 증가시켜 하방향 이동시 방전이 발생하는 경우 전압변화를 측정된 것이다.

듀티팩터가 DF=0.3이고 인가피크전류가 Pc=11, 15 및

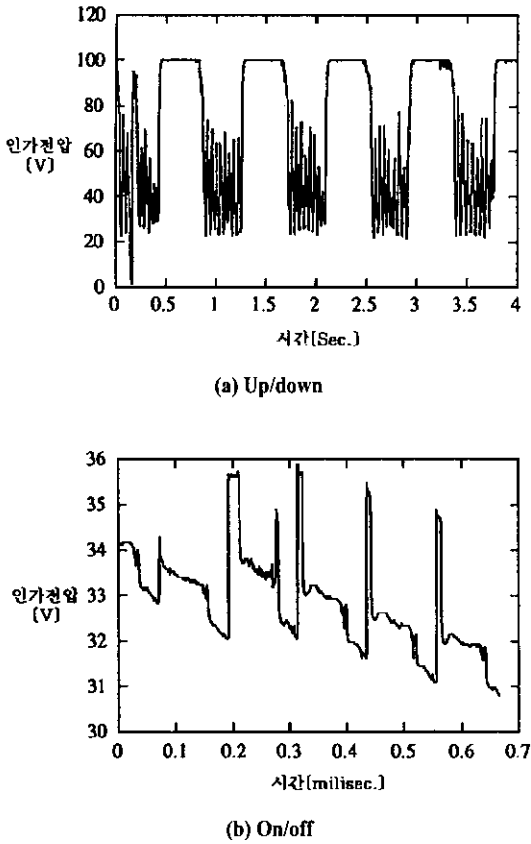


Fig. 3 Measured discharge voltage

19 암페어(A)의 가공조건으로 전극봉내 구멍직경 변화에 따른 공작물체거속도 변화를 Fig. 4에 나타내었으며, 인가 피크전류가 증가함에 따라 가공속도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 전극봉 내경이 솔리드(0mm)상태일 경우보다 전극봉 내경이 4mm와 6mm일 때 공작물체거속도가 감소하였지만, 내경이 8mm와 10mm인 경우는 오히려 가공속도가 점차적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 방전가공이 계속 진행 중에서 마지막 단계인 가공깊이 5mm에 근접할 때 전극봉 내경에 피삭재 일부가 닿아 2차방전이 계속적으로 발생하여 가공시간이 지연된 것이며 사료되며, 특히 전극봉 내경이 10mm인 경우 이 현상이 두드러져 가장 빠른 가공속도를 얻었다.

Fig 5(a), 5(b) 및 5(c)는 듀티팩터 DF=0.24와 인가피크 전류 Pc=19A의 가공조건으로 각각 전극봉 내경이 각각 0, 6 및 10mm인 경우 측정된 표면거칠기 형상이다. 열적

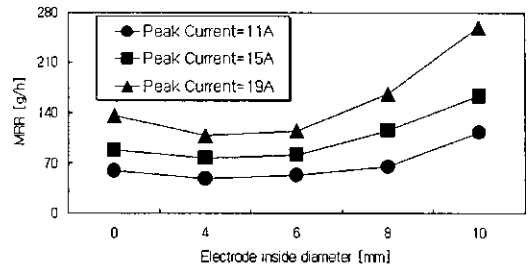


Fig. 4 Effects of electrode inside diameter on MRR (DF = 0.3)

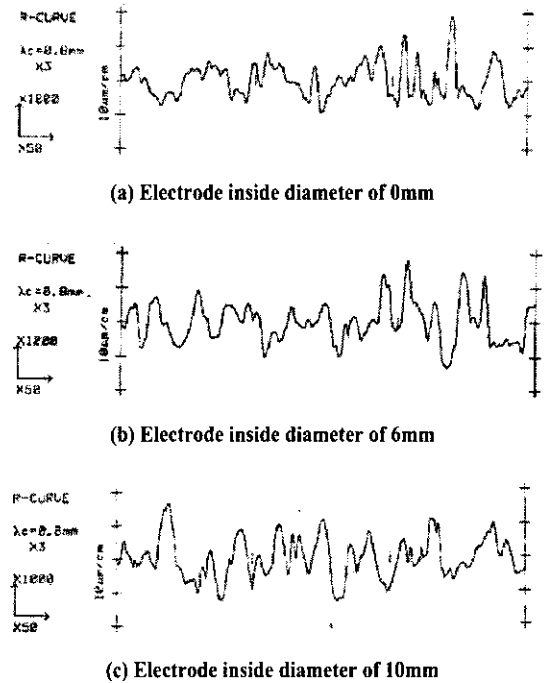


Fig. 5 Typical profiles of maximum surface roughness (peak current = 19 A and DF = 0.24)

손상 영역으로 표면형상은 일정하지 않으며, 내경의 변화에 따라 큰 변화를 나타내지 않고 있다.

전극봉의 내경 변화에 따른 측정된 표면거칠기 프로파일을 동일조건으로 시편을 회전시키면서 4회 반복 측정하여 얻은 최대높이거칠기의 평균값을 Fig. 6에 나타내었다. 동일한 가공조건으로 전극봉을 솔리드상태와 내경변화를 4, 6, 8 및 10mm인 경우에 측정한 값들로 내경이 6, 8mm에 표면거칠기상태 변화는 적게 나타났다. 하지만

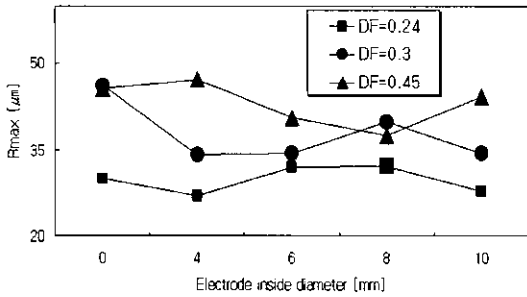
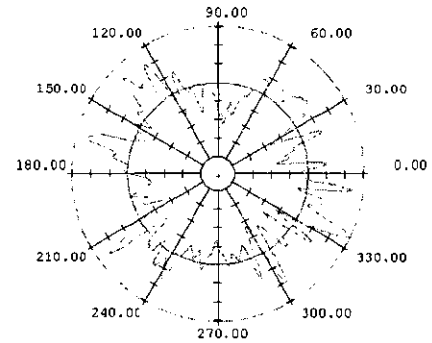
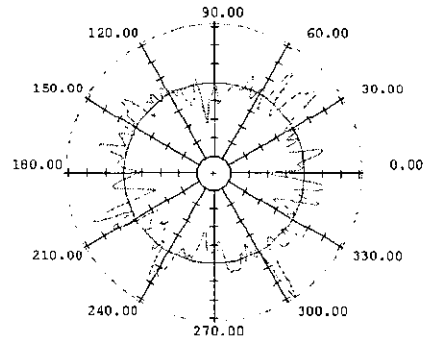


Fig. 6 Effects of electrode inside diameter on  $R_{max}$  (peak current = 19A)



(b) Electrode inside diameter of 6mm



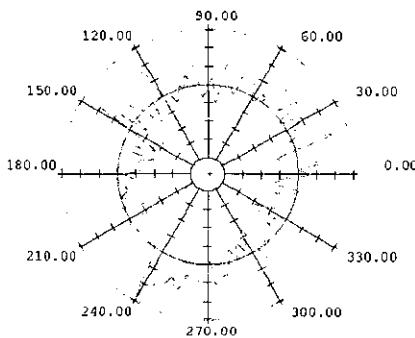
(c) Electrode inside diameter of 10mm

솔리드 상태인 경우 다른 전극봉의 내경 변화보다는 표면 거칠기상태가 나쁜 경향으로 나타났는데, 이것은 방전유의 영향을 적게 받아 칩의 배출이 잘되지 않기 때문인 것으로 생각된다. 듀티팩터값이 0.24에서 0.45로 증가할 때 표면거칠기가 나빠진다는 것을 확인할 수 있었고, 전극봉의 내경이 8mm인 경우 듀티팩터 0.3과 0.45에서 약간의 차이를 보이고 있다.

인가피크전류 15암페어와 듀티팩터 0.45의 가공조건으로 전극봉 내경이 솔리드상태와 내경변화를 6, 및 10mm인 구멍속으로 방전유를 분사시키면서 가공한 피삭재의 진원도를 측정된 결과를 1000배의 배율로 Fig. 7(a), 7(b) 및 7(c)에서 각각 나타냈으며, 측정된 결과는 마치 진원도의 상태가 유사한 것으로 보인다.

하지만 인가피크전류 15암페어의 가공조건에서 전극봉 내경 변화에 따른 측정된 진원도 값들의 내외접원의 직경차를 구한 진원도 값은 Fig. 8과 같이 나타났다. 듀티팩터

Fig. 7 Typical profiles of roundness (peak current = 15 A and DF = 0.45, magnification = 1000X)



(a) Electrode inside diameter of 0mm

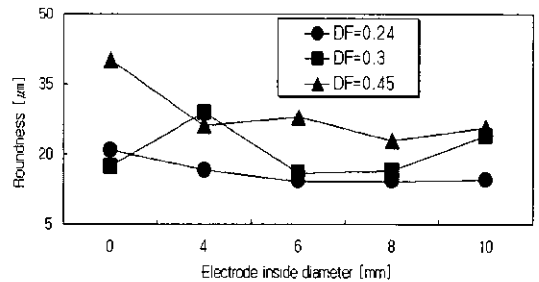
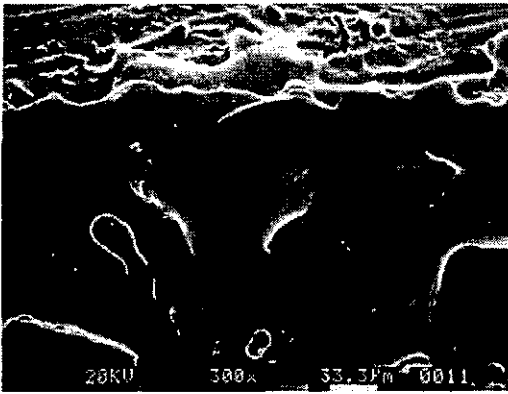
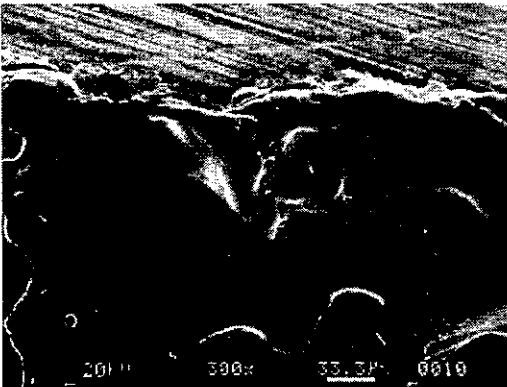


Fig. 8 Effects of electrode inside diameter on roundness (peak current = 15 A)

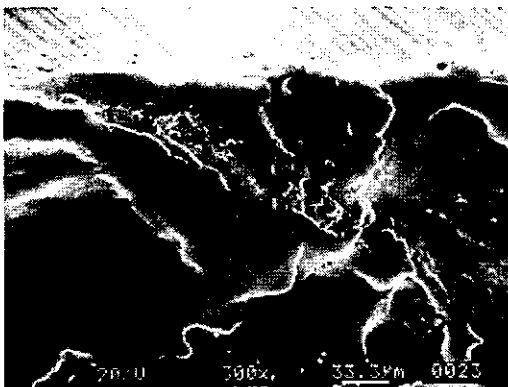
가 0.24와 0.45에서는 전극봉 내경 변화에 대한 진원도 상태가 솔리드 상태에선 진원도 값이 크나 구멍내경이 있



(a) Electrode inside diameter of 0mm



(b) Electrode inside diameter of 6mm



(c) Electrode inside diameter of 10mm

Fig. 9 SEM micrographs of EDMed surface (magnification = 300X)

는 경우 감소하고 내경변화에 따라 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

Fig. 9(a), 9(b) 및 9(c)는 듀티팩터 DF=0.45와 인가파크 전류 15암페어에서 각각 전극봉을 솔리드 상태, 내경변화를 6, 10mm로 한 경우 방전가공된 시편의 미세조직 사진을 배율 300으로 나타낸 것이다. 사진에서 보듯 방전가공이 이루어지면서 순간적으로 높은 열에 의해서 용융됨과 동시에 일부는 녹아 흘러내리다가 녹아 붙어 용융층들을 이루고 있는데, 전극봉의 내경이 0mm인 경우에는 내경이 10mm일 때보다 방전가공시 발생하는 칩의 배출이 잘 되지 않고 피삭재면 위에 많이 녹아 붙어있는 것을 육안으로 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

기존의 형조방전가공법에 전극봉의 내경 변화에 따른 방전유를 구멍속으로 분사시키는 방전유 분사시스템을 설계 제작하여, 고순도의 전극봉 구리를 사용하여 고탄소-고크롬 공구강(SKD-11)을 형조방전가공실험을 수행하여 공작물제거속도, 최대높이거칠기, 진원도상태 및 미세조직 분석 등을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공작물제거속도는 인가파크전류가 증가함에 따라 빠르다는 증가하며, 전극봉의 내경이 솔리드(0mm) 상태일 경우보다 내경이 4mm와 6mm일 때 가공속도는 감소하지만, 내경이 8mm와 10mm에서는 다시 증가하였다.
- (2) 표면거칠기상태는 듀티팩터가 증가할수록 나빠지는 경향을 나타내며, 듀티팩터 0.24인 경우 전극봉의 내경 변화에 따른 가공면의 상태변화는 거의 일정하며 또한 양호한 값을 나타내나, 듀티팩터가 0.3과 0.45에서는 솔리드상태인 경우가 내경 변화가 있는 경우보다 더 표면거칠기상태가 나쁜 것으로 나타났다.
- (3) 진원도는 듀티팩터가 낮을수록 양호하며, 솔리드상태가 내경변화가 있는 것보다 불량한 상태를 나타냈다.
- (4) 방전가공된 면의 미세조직에서는 여러 부분에서 많은 용융층들이 관찰되었으며, 전극봉이 솔리드 상태보다 내경이 10mm일 때보다 방전가공시 발생하는 칩의 배출이 잘되지 않아 피삭재의 표면 위에 녹아 붙어 용융층이 더 많이 있는 것을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 1998년도 경남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 씌어진 것임.

## 참 고 문 헌

- (1) S. Abrate and D. Walton, "Machining of composite materials. part II : nontraditional methods," *Composite Manufacturing*, Vol. 3, No. 2. pp. 85~94, 1992.
- (2) N. Mohri, N. Saito and Y. Tsunekawa, "Metal surface modification by electrical discharge machining with composite electrode," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, pp. 219~222, 1993.
- (3) N. Mohri, H. Takezawa and N. Saito, "On-the-machine measurement in EDM process by a calibration system with polyhedra," *Annals of the CIRP*, Vol. 43, pp. 203~206, 1994.
- (4) N. Mohri, M. Suzuki and M. Furuya, "Electrode wear process in electrical discharge machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 165~168, 1995.
- (5) M. Kunieda and M. Yoshida, "Electrical discharge machining in gas," *Annals of the CIRP*, Vol. 46, pp. 143~146, 1997.
- (6) P. Koshy, V. K. Jain, and G. K. Lal, "Experimental investigations into electrical discharge machining with a rotating disk electrode," *Precision Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 6-15, 1993.
- (7) 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.