

# 마이크로 방전가공에서 Round Trip Method 를 이용한 전극마모 보정

박성준#, 김영태\*, 민병권\*\*, 이상조\*\*

## Tool Electrode Wear Compensation using Round Trip Method for Machining Cavities in Micro EDM Process

Sung-Jun Park<sup>#</sup>, Young-Tae Kim<sup>\*</sup>, Byung-Kwon Min<sup>\*\*</sup> and Sang-Jo Lee<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

Electrical discharge machining (EDM) is one of the most extensively used non-conventional material removal process. The recent trend in reducing the size of product has given micro EDM a significant amount of research attention. Micro EDM is capable of machining not only micro holes and micro shafts as small as a few micrometers in diameter but also complex three dimensional micro cavities. But, longitudinal tool wear by electrical discharge is indispensable and this affects the machining accuracy in micro EDM process. Therefore, newly developed tool wear compensation strategy called round trip method is suggested and verified by experiment. In this method, machining depth of cut, overlap effect and critical travel length are also considered.

**Key Words:** Micro EDM (마이크로 방전가공), WEDG (Wire Electro Discharge Grinding, 와이어 방전 연삭), Tool wear (공구 마모), Compensation (보정)

### 1. 서론

최근에 부품이 소형화되고 정밀화 되면서 마이크로 방전가공(Micro EDM)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 방전가공은 전기적으로 발생한 열에너지를 이용하여 재료의 경도에 관계없이 전도성 재료를 가공하는 방법이다. 또한, 전극과 공작물이 직접적인 접촉을 하지 않기 때문에 잔류응력, 채터 및 진동발생과 같은 문제점이 없다. 이러한 장점으로 인하여 금형, 자동차, 항공부품 및 시

계부품과 같은 초소형 부품의 제작에 주로 사용되고 있다.<sup>1</sup>

현재 마이크로 방전가공은 수 마이크로 미터의 지름을 가지는 마이크로 구멍 및 마이크로 축뿐만 아니라 복잡한 3 차원 형상의 캐비티 가공까지도 가능한 수준에 이르렀다. Masuzawa<sup>2,3</sup>는 마이크로 방전현상을 이용하여 마이크로 핀, 마이크로 노즐과 같은 미세 부품을 제작하였으며, 반도체 공정에서 사용하는 포토 마스크를 방전가공으로 제작하려는 시도도 있었다.<sup>4</sup>

접수일: 2004 년 1 월 13 일; 게재승인일: 2004 년 8 월 13 일

# 교신저자: 연세대학교 나노과학기술연구원

Email: sjpark@yonsei.ac.kr Tel: (02) 2123-2818

\* 삼성전기주식회사 DM 사업부

\*\* 연세대학교 기계공학부

이와 같이 마이크로 방전가공은 미세 부품을 제작하는데 적합한 많은 장점을 가지고 있지만, 가공 특성상 필연적으로 공구로 사용하는 전극의 마모가 발생한다는 약점을 가지고 있다. 이러한 전극마모의 발생은 균일한 가공이 어렵게 만들 뿐 아니라 형상 정밀도에도 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 마모를 보정하기 위한 연구가 선행되어야 한다.

기존의 발표된 전극마모 보정에 대한 내용을 살펴보면 우선, Yu<sup>5</sup>는 등고선 가공과 균일 전극마모법(uniform wear method)을 제안하였다. 축방향으로 발생하는 전극마모를 본 연구에서 제안하는 방법과 유사하게 왕복가공을 중첩하여 보정하는 방법이다. 하지만, 공구경로에 대한 오버랩의 영향을 고려하지 않았으며, 공구 측면 마모문제로 인하여 경로를 이중으로 해야 하기 때문에 가공시간이 길어지는 단점이 있다. Bley<sup>6</sup>는 실시간으로 공구마모를 보정하는 방법을 제안하였다. 예비실험을 통하여 가공조건에 따른 축 방향 공구 마모량을 미리 측정된 후에 공구 이동경로에 따라 연속적으로 공구를 아래쪽으로 이동시켜 결국 공구 끝이 일정한 위치를 유지하게 하는 방법이다. 이 방법은 공구 축방향의 위치 결정 정밀도가 매우 뛰어난 시스템에 한정하여 적용할 수 있으며, 가공조건에 따른 공구 마모량을 미리 알고 있어야 한다. Dauw<sup>7</sup>는 인가 전압의 펄스 특성에 대한 고찰을 통해 공구 마모를 실시간으로 측정하는 시스템을 고안하기도 하였다. 이와 같은 공구보정 방법 이외에 Kunieda<sup>8</sup>와 같이 고속 가스를 절연매질로 사용하여 마이크로 방전가공에서 공구마모를 줄이기 위한 시도도 있었다.

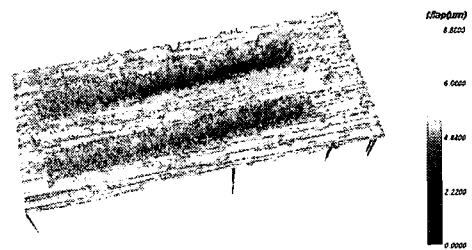
본 논문에서는 단순한 형상의 전극을 이용하여 마이크로 방전가공에 의해 미세 캐비티 형상을 가공할 때 발생하는 전극 마모를 실험적으로 고찰하여, 그 결과를 토대로 Round trip method로 명명한 새로운 전극마모 보정방법을 제안하였다. 이 방법에서 축방향 스텝 깊이와 임계 가공 길이를 수식적으로 결정하였으며, 오버랩의 영향을 수식적으로 유도하여 컵(cusp) 높이를 고려한 최적의 오버랩을 선정하였다.

슬롯 가공을 통해 방전거리에 따른 가공 형상과 표면을 관찰하였고, 사각형과 원 형상의 캐비티 가공을 실시하여 제안된 전극마모 보정방법의 타당성을 검토하였다.

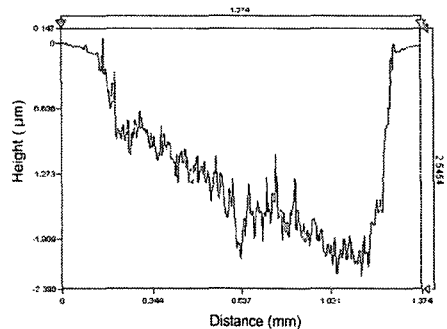
## 2. 이론

### 2.1 전극마모

방전가공 특유의 가공기구에 의해 공작물이 용융 및 기화에 의해 제거됨과 동시에 전극도 마찬가지로 소모되게 된다. 가공 도중에 발생하는 전극의 마모는 방전간극이 일정한 경우, 가공깊이가 작아지게 되는 효과를 가져온다. 이러한 현상은 슬롯 가공을 통해 확인할 수 있다.



(a) Slot machining



(b) Topographical image of machined surface

Fig. 1 Shortening of machining depth owing to tool wear

Fig. 1은 지름 100 $\mu\text{m}$ 의 전극을 이용하여 초기 방전 간극을 2 $\mu\text{m}$ , 이송거리 900 $\mu\text{m}$ 로 슬롯가공 했을 때의 가공면 형상을 비접촉 3 차원 측정장치로 측정된 결과이다. 가공 조건은 저항 800ohm, 콘덴서 용량 100pF, 인가전압 150V, 펄스지속시간 14 $\mu\text{s}$ , 휴지시간 6 $\mu\text{s}$ , 이송속도 5 $\mu\text{m/s}$ , 전극회전속도 250 rpm 이다. 공작물의 재질은 텅스텐이다. 일반적인 가공면의 형상과는 달리 Fig. 1(b)와 같이 바닥면 형상이 편평하지 않고, 전극의 마모에 따라 가공면의 높이가 달라져서 기울어진 형상을 볼 수 있다. 즉, 방전가공에서 형상정밀도를 높이기 위해서는 전극마모의 보정이 필수적임을 알 수 있다.

## 2.2 전제조건

전극 마모를 보정하기 위해 본 연구에서 제안하는 방법을 사용하기 위해서는 다음의 두 가지 전제조건을 미리 만족되어야 한다. 모든 가공조건이 설정된 경우, 전제조건은 다음과 같다.

**조건 1** 방전간극( $G$ )은 일정하다.

**조건 2** 재료 제거율과 전극의 마모율간에는 일정한 비례관계가 존재한다.

이전 연구<sup>9</sup>에 의하면 가공조건이 일정한 경우 방전이 미치는 거리인 방전간극은 거의 일정하다. 따라서, 조건 1 은 본 논문내용 전체에 걸쳐 만족되는 것으로 간주한다.

재료 제거에 대한 전극 마모비를 실험적으로 구한 결과는 Fig. 2 에 나타내었고 Table 1 에 가공조건을 정리하였다. 지름 100 $\mu\text{m}$  전극을 가지고 크기 500 $\mu\text{m}$ , 깊이 100 $\mu\text{m}$  인 정사각형 캐비티 형상을 가공할 경우 일정한 깊이만큼 왕복 가공한 경우 일정 제거 체적당 전극 마모를 측정하여 도시한 결과이다. 재료 제거에 대한 전극마모의 비는 거의 비례적으로 증가하며 조건 2 를 만족한다.

Table 1 Machining conditions

Legend	Capacitor (pF)	Voltage (A)	Feedrate ( $\mu\text{m/s}$ )	Spindle (rpm)	On/off time( $\mu\text{s}$ )
1	10	150	5	250	6/14
2	10	150	5	250	3/7
3	10	150	5	250	0.6/1.4
4	100	150	5	250	RC
5	500	150	5	250	RC
6	5000	150	5	250	RC
7	5000	150	5	250	RC

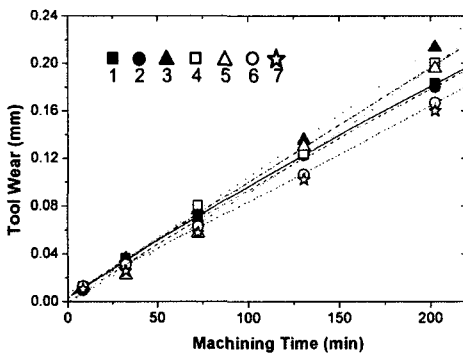


Fig. 2 Tool wear trend with machining time

## 2.3 Round trip method

가공조건이 결정되고 공작물과 초기간극  $g_i$  를 유지한 상태에서 1 차 이송하여 가공을 하면 Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 포물선 형상의 가공면 형상을 얻게 된다. Fig. 2 에 나타낸 재료제거에 대한 전극마모비가 결국 포물선의 형상을 좌우하게 되는데, 전극마모비가 클수록 포물선의 기울기가 급해지고 상대적으로 전극이 덜 마모 되는 가공조건에서는 완만한 기울기를 가지게 된다. 실험을 통하여 구한 재료제거체적에 대한 전극마모체적의 비는 홀 가공의 경우에 약 3-10 정도의 값을 가지며, 캐비티 가공의 경우에는 약 10-170 사이의 값을 가진다. 물론, 가공 조건의 변화에 따라서 이보다 더 큰 값도 가질 수 있다.

일정한 가공길이  $L$  만큼 이송한 후에 전극 마모 길이를 보정하기 위하여 스텝 깊이  $S_i$  만큼 축 방향으로 진입하여 다시 이전 경로를 따라 2 차 이송을 하게 되면 편평한 가공 표면을 얻을 수 있게 된다. 제안된 방법을 사용하게 되면 전극의 이동에 따라 실시간으로 전극 길이방향의 마모량을 보정할 필요없이 이송거리에 대한 전극의 마모량만으로 스텝 깊이  $S_i$  를 구하여 간단하게 원하는 형상을 얻을 수 있는 장점이 있다. 가공 후 바닥면의 형상은 약간 볼록한 형상이 된다. 하지만, 이 공차는 방전 가공으로 얻을 수 있는 표면 거칠기 이내의 값(약 1 $\mu\text{m}$  이하)이므로 무시할 수 있다.

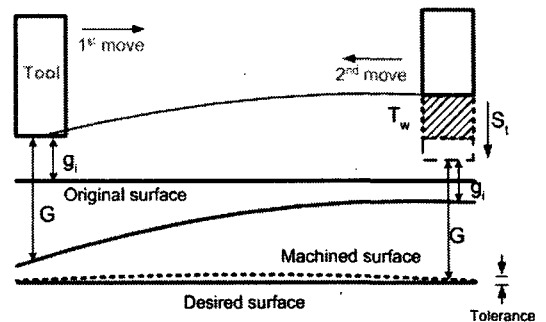


Fig. 3 The principle of round trip method

## 2.4 스텝 절삭깊이의 결정

Round trip method 를 실제가공에 적용하기 위해서는 경로를 가공한 후, 두 번째 왕복경로 가공을 위해 스텝 절삭깊이  $S_i$  를 결정해야 한다. Fig. 4 에 나타낸 관계에 의하여 식(1)과 같이 구할 수 있다.

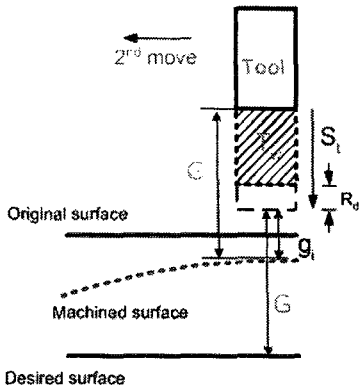


Fig. 4 Calculation of the step depth  $S_i$

$$\begin{aligned} G &= T_w + g_i + R_d \\ S_i &= T_w + R_d \\ S_i &= G - g_i \end{aligned} \quad (1)$$

앞의 식 (1)에서 스텝 절삭깊이  $S_i$ 는 방전간극  $G$ 와 초기간극  $g_i$ 의 차로 구할 수 있다. 여기서, 초기간극은 가공조건으로 설정한 값이며 방전간극은 실험으로부터 미리 알고 있는 값이기 때문에 손쉽게 스텝 절삭깊이를 구할 수 있다.

### 2.5 임계가공길이의 결정

가공 도중에 전극의 마모길이가 초기간극  $g_i$ 의 합이 방전간극  $G$ 를 초과하게 되면 가공이 더 이상 진행되지 않는다. 이러한 관계는 Fig. 5에 나타내었다. 그래프의 세로축은 전극마모체적을 전극의 단면적으로 나눈 값, 즉 전극마모길이를 나타낸다. 전극마모길이가 방전간극과 초기 간극의

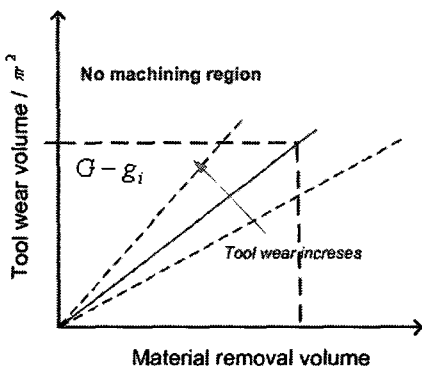


Fig. 5 Calculation of the critical travel length

차( $G - g_i$ )일 때의 재료제거 체적으로부터 임계가공길이  $L_{ct}$ 를 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$MRV \approx \frac{1}{2} \cdot D \cdot (G - g_i) \cdot L_{ct} \quad (2)$$

### 2.6 오버랩의 영향

마이크로 방전현상을 이용하여 슬롯 가공을 할 경우, 전극의 이송방향에 대하여 직각인 가공 단면의 형상은 Fig. 6에 나타낸 것처럼 일정한 곡률을 가진 형태가 된다. 전극의 중심부분은 깊이 방향으로 가공이 많이 되지만 전극의 가장자리 부분은 상대적으로 가공깊이가 작다. 이러한 현상으로 인해서 밀링 가공과 같이 경로간격을 주면서 이송을 하게 되면 필연적으로 커슁(cusp)이 발생하게 된다.

실제 가공된 방전면의 형상과 유효반경과의 관계는 Fig. 6에 나타내었다. 유효반경의 크기는 가공조건에 따라 달라지게 된다. 유효반경의 크기를 반지름으로 하는 가상의 공구로 가정하고 경로간격의 오버랩에 따른 커슁의 높이를 기하학적인 관계로부터 계산하였다.

경로간의 오버랩에 따라서 커슁의 높이는 변하게 된다. 마이크로 방전가공에 의해 제어할 수 있는 표면 거칠기는 일반적으로  $R_{max} 1\mu m$  정도이다. 따라서, 모의 실험을 통해서 최종적으로 커슁의 높이가 방전 가공에 의해서 생성되는 표면 거칠기 값보다 작게 나오는 최적의 경로간 오버랩을 계산하면 커슁의 발생을 고려할 필요가 없이 가공 시간을 단축할 수 있다.

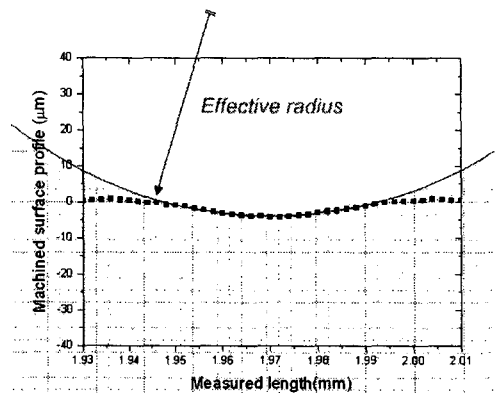


Fig. 6 Machined surface profile and effective radius

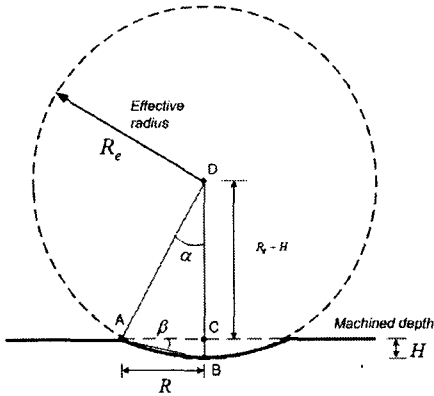


Fig. 7 Relations between machined surface shape and effective radius

Fig. 7 에 나타난 가공면의 형상과 유효반경과의 기하학적인 관계로부터  $\overline{AB}$  를 표시하면 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{AB}^2 &= R_e^2 + R_e^2 - 2R_e^2 \cos \alpha \\ &= 2R_e^2 (1 - \cos \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

위의 식에서 각도와 유효 반경은 미지수이므로 각도에 관한 항을 제거하기 위하여 다음과 같은 관계식을 사용한다.

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{R_e - H}{R_e} = 1 - \frac{H}{R_e} \\ \cos \beta &= R / \overline{AB} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하여 유효공구반경을 구하면 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$R_e = \frac{1}{2H} \left( \frac{R}{\cos \beta} \right)^2 \quad (5)$$

유효 반경을 반지름으로 하는 가상의 공구로 가정하고, 공구에 의해 이웃하는 경로 사이의 간격을  $p$ , 커스 높이를  $H_{cusp}$  으로 할 때 다음과 같은 관계식이 성립하게 된다.

$$R_e^2 = (R_e - H_{cusp})^2 + \left( \frac{p}{2} \right)^2 \quad (6)$$

다시  $p$  에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$p = 2\sqrt{2H_{cusp}R_e - H_{cusp}^2}, \quad H_{cusp} < \frac{1}{2}R \quad (7)$$

커스의 높이는 식 (7)을 전개하여 구하면 다음 식 (8)과 같은 형태로 구할 수 있다.

$$H_{cusp} = \frac{(2R_e - \sqrt{-p^2 + 4R_e^2})}{2} \quad (8)$$

### 3. 모의 실험 및 검증

#### 3.1 가공 모의실험

제안된 전극마모 보정방법을 이용하여 슬롯가공을 할 때 전극의 이송방향으로 표면의 형상이 어떻게 변화하는 지를 알아보기 위하여 모의실험을 하였다. 2 절에서 미리 서술한 바와 마찬가지로 방전간극은 일정하다고 가정하였고, 재료제거체적에 대한 전극마모체적의 비 즉, 전극마모비는 1:20로 설정하였다. 초기간극은  $2\mu\text{m}$  이며 이송거리는  $1\text{mm}$  로 하였다. 모의실험조건은 Table 2 에 정리하였다. Round trip method 를 이용하여 전극마모를 보정하여 가공한 표면은 Fig. 8 에 나타내었다.

Table 2 Simulation conditions

Parameter	Specification
Initial gap	$2\mu\text{m}$
Working gap	$4\mu\text{m}$
Travel	$1000\mu\text{m}$
Tool wear ratio	1:20

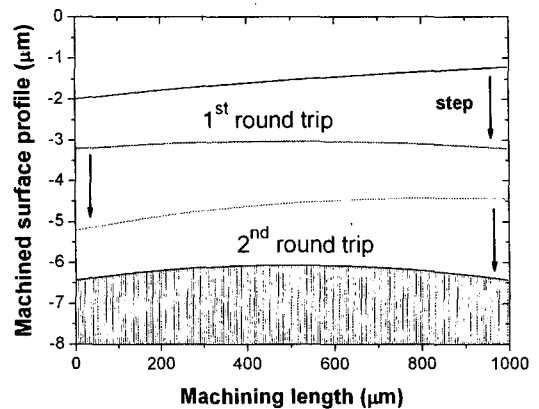


Fig. 8 Simulated machined surface profile by round trip method

모의실험의 결과를 살펴보면, 이송거리 1mm 인 경우 가공면 형상의 최대오차, 즉 최대 표면 거칠기  $R_{max}$  는  $0.36\mu\text{m}$  이다. 만약, 한번에 이송하는 공구경로의 길이를 1mm 보다 작게 나누어 가공하거나 전극마모비가 작은 가공조건을 사용한다면 좀 더 편평한 가공면 형상을 얻을 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

### 3.2 가공면 형상 검증

이송길이 1mm 로 실제 가공된 바닥면의 형상은 Fig. 9 에 표시하였다. 측정된 형상 데이터를 곡선적합한 결과와 모의실험을 통해 구한 형상을 서로 비교해 보면 거의 일치한다. 따라서, Round trip method 의 기본적인 개념이 틀리지 않았음을 검증할 수 있다. 실제 가공면의 형상은 최대  $1.5\mu\text{m}$  의 오차를 가지고 있는데, 가공길이가  $1000\mu\text{m}$  이고 별도의 정밀한 제어장비를 갖추지 않은 점을 감안하면 제안된 방법이 타당하다고 할 수 있다.

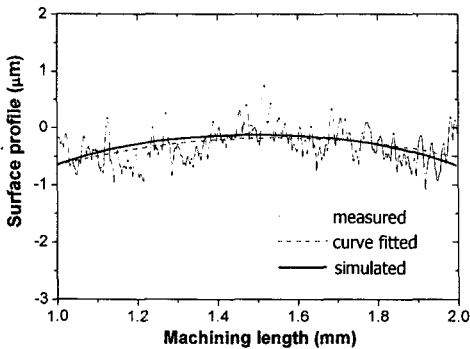


Fig. 9 Simulated and measured surface profile

### 3.3 커스높이 계산

가공조건과 경로간 간격에 의해 발생하는 커스높이를 계산하기 위해서는 먼저 유효 공구 반경을 알아야 한다. Fig. 10 은 가공조건을 달리하여 27 회 실험한 결과로부터 구한 유효 공구 반경값을 나타낸다.

실험을 통해 구한 가공조건에 따른 유효 반경을 가지고 가공 후에 생성되는 커스높이를 계산하였다. 경로간 간격이 150, 100, 80,  $50\mu\text{m}$  의 네 가지 경우에 대하여 모의실험을 하였다. 이때, 전극의 지름은  $150\mu\text{m}$  이다. Fig. 11 에는 가공조건과 경로간 간격에 따른 커스 높이를 계산한 결과를 보

였다. 결과를 보면 경로간 간격이  $50\mu\text{m}$  이하인 경우 커스의 높이가 대부분  $0.3\mu\text{m}$  이하이며, 가공조건에 따라서는  $0.1\mu\text{m}$  이하의 값을 가진다. 경로간 간격이  $100\mu\text{m}$  인 경우를 살펴보면 약  $1\mu\text{m}$  이하의 커스높이를 가진다. 따라서, 오버랩을 적절하게 설정하면 커스의 영향을 고려하지 않고 가공해도 된다.

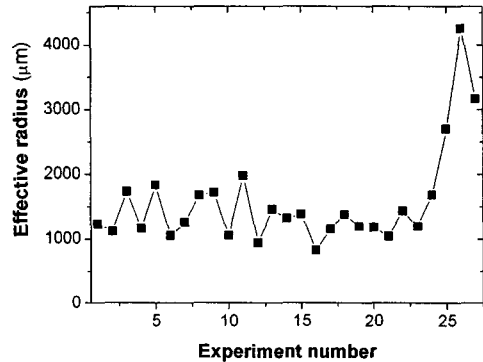


Fig. 10 Calculated effective radius using experiment data

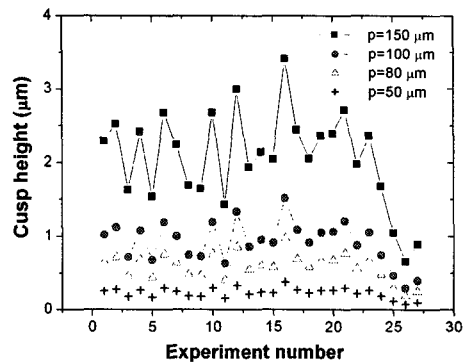


Fig. 11 Cusp height owing to overlap

### 3.4 개념의 확장

Round trip 방법을 적용하여 단일 방향으로 슬롯 가공을 한 결과 바닥면의 형상오차가 방전가공으로 얻을 수 있는 표면거칠기 이내로 제어되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 가공조건과 경로간 간격에 의해 발생하는 커스높이가 마찬가지로 적절하게 선정된 오버랩에 의하여 무시할 수 있음을 계산하였다. 이와 같은 결과를 종합하면 단일 방향의 선 가공에만 적용한 것을 면 가공으로 확장할 수 있다. 이러한 개념을 Fig. 12 에 간단하게

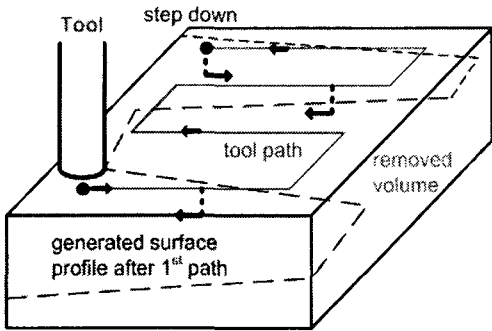
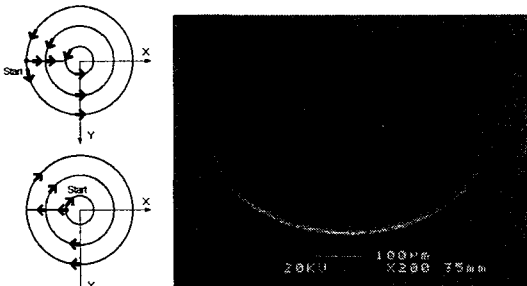


Fig. 12 The augmented round trip machining strategy

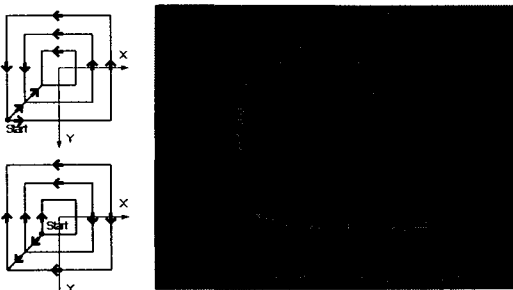
나타내었다. 임의의 경로를 따라 경로간 간극을 고려하여 가공을 하게 되면 그림에서 보는 바와 같이 일정한 형상을 제거할 수 있다.

#### 4. 실험결과

확장된 Round trip method 를 가지고 캐비티 형상 가공에 적용하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.



(a) Circular shape



(b) Rectangular shape

Fig. 13 Generated tool paths and machined surfaces

실제 가공된 원 형상과 사용된 공구경로는 Fig. 13(a)에, 사각 형상은 Fig. 13(b)에 나타내었다. 사용된 전극의 지름은 100µm 이며 경로간 간격은 전극 지름의 50%로 했다.

공구 경로는 나타낸 바와 마찬가지로 왕복이송 방식이며, 한 층의 가공이 다 끝난 후에는 계산된 스텝 깊이만큼 전극 축 방향으로 이송하여 다음 층을 가공하게 된다. 원 형상과 사각 형상의 캐비티 모두 바닥면이 편평하게 가공된 것을 볼 수 있으며 형상 또한 양호하다.

Fig. 14 에는 전극 축 방향으로 좀 더 깊이 가공된 캐비티 형상의 가공 예를 제시하였다. 복잡한 형상의 구조물을 제작할 수 있는 가능성을 엿볼 수 있다.

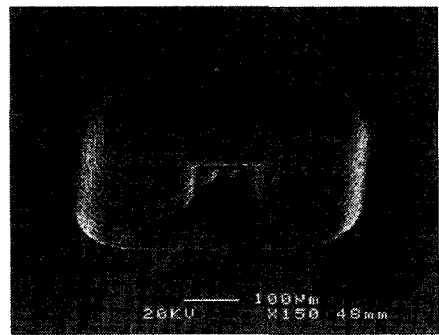


Fig. 14 Machined cavity by round trip method

#### 5. 결론

본 연구에서는 개발한 마이크로 방전 가공기<sup>9</sup>를 이용하여 캐비티 형상의 정밀 가공을 위한 전극 마모 보정방법과 공구경로 생성에 대한 방법을 제안하였으며 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 모의실험을 통하여 가공시간에 따라 계속적으로 진행되는 전극의 마모를 실시간으로 보정하지 않고도 평탄한 면을 얻을 수 있음을 확인하였으며 실제 가공실험을 통해 검증하였다.
2. 유효 반경의 개념을 도입하여 컵의 높이를 계산하고, 적절한 경로간 간격의 설정을 통해 컵 높이에 의한 오차를 최소화 할 수 있도록 하였다.
3. 적절하게 선정된 경로간격 및 가공조건과 단순하게 확장된 전극마모 보정원리를 이용하면 추

가적인 제어기술 없이 미세 캐비티 형상을 정밀하게 가공할 수 있다.

### 참고문헌

1. Ho, K.H., Newman, S.T., "State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM)," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, pp. 1287-1300, 2003.
2. Masuzawa, T., Fujino, M., Kobayashi, K., "Wire Electro Discharge Grinding for Micro Machining," Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 1, pp. 431-434, 1985.
3. Masuzawa, T., Kuo, C.L., Fujino, M., "A Combined Electrical Machining Process for Micro Nozzle Fabrication," Annals of the CIRP, Vol. 43, No. 1, pp. 189-192, 1994.
4. Yeo, S.H., Yap, G.G., "A Feasibility Study on the Micro Electro Discharge Machining Process for Photomask Fabrication," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 18, No. 1, pp. 7-11, 2001.
5. Yu, Z.Y., Masuzawa, T., Fujino, M., "Micro EDM for Three Dimensional Cavities - Development of Uniform Wear Method," Annals of the CIRP, Vol. 47, No. 1, pp. 169-172, 1998.
6. Bleys, P., Kruth, J.P., Acryd, A., Delpretti, R., Tricarico, C., "Real-time Tool Wear Compensation in Milling EDM," Annals of the CIRP, Vol. 51, No. 2, pp. 157-160, 2002.
7. Dauw, D., Snoeys, R., "On the Derivation and Application of a Real-time Tool Wear Sensor in EDM," Annals of the CIRP, Vol. 35, No. 1, pp. 111-116, 1986.
8. Kunieda, M., Yoshida, M., Taniguchi, N., "Electrical Discharge Machining in Gas," Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 1, pp. 143-146, 1996.
9. Kim, Y.T., Park, S.J., Lee, S.J., "Micro Shapes Machining using Micro EDM Process," Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 9, pp. 109-117, 2003.