

마이크로 EDM공정을 이용한 마이크로 바늘의 제조

리춘미^a, 권원태^{a*}

Manufacturing of Micro-needle Using Micro-EDM Process

Choon-Mee Lee^a, Won Tae Kwon^{a*}^a Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul,
163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	15	February	2017
Revised	28	April	2017
Accepted	12	May	2017

Keywords:

Micro-needle
Micro-EDM
Alignment mechanism
Extreme aspect ratio

ABSTRACT

Micro-needles are used as transferring devices for sampling of tiny constitute substances from biological bodies. Typically, nickel is used as a coating to improve the rigidity of micro-needles. This study introduces the methodology to manufacture a WC needle with very high hardness and toughness. Micro-EDM technology was used to manufacture micro-needles with holes 130 μm in diameter and 2300 μm in length. A micro-needle was aligned to the micro-EDM electrode using a custom two degree-of-freedom alignment system. A three-step manufacturing technique was developed to drill a micro-hole using a WC electrode. In the first process, an electrode 105 μm in diameter was used to make a hole. Electrodes of 90 and 105 μm diameters were used in the second and third process, respectively. Consequently, a WC micro-needle with an inner hole of 135 μm diameter, length of 2300 μm , and outer diameter of 300 μm was developed.

1. 서론

마이크로 바늘은 인체나 생물 체내에 약물 전달, DNA와 같은 체내의 물질을 검출 분석하는 용도로 많이 사용되는데, 물질을 채취하고 검출하기 위해서는 충분한 길이와 높은 강도가 있어야 한다. 현재까지 몇 가지 방법으로 마이크로 바늘을 제작하는 연구가 진행되었는데 뒷면 노광법과 감광제의 열분해법을 이용하여 다양한 형상을 가지는 탄소 마이크로바늘의 제조방법이 그 하나이다^[1]. 기판 표면에 생분해성 점성 물질을 코팅하고 기둥으로 패터닝된 프레임으로 점성 물질을 인발하면서 응고시킨 후 그 응고된 표면을 금속도금한 후 점성물질을 제거하는 방법도 소개되었다^[2]. 마이크로 방전가공은 가공 중 발생하는 전극 소모

와 전도성 재질만 가공이 가능한 단점이 있지만, 전기적인 방전을 이용한 비접촉 가공으로 가공 중 발생하는 잔류응력, 비틀림 및 진동에 관한 문제로부터 자유롭고, 가공이 수십 분의 1 μm 정도의 가공 정밀도로 가공이 가능하며^[3], 일반적으로 세장비 10 이상을 가지는 미세 구멍을 버(burr)없이 가공이 가능하다. 세장비 극대화를 위한 미세구멍의 최적가공 조건을 결정하는 실험도 진행되고 있다^[4]. Masuzawa는 EDM을 통해 마이크로 핀, 마이크로 노즐, 마이크로 파이프를 가공 하였으며^[5-8], Allen은 잉크젯 프린터의 마이크로 노즐을 만드는데 이를 적용했다^[9]. Jahan은 RC회로와 트랜지스터 회로를 이용하여 가공된 미세 구멍에 대한 평가하였다^[10].

본 연구에서는 세장비를 극대화 하면서 강도가 높은 중공형 마이

* Corresponding author. Tel.: +82-2-6409-2386

Fax: +82-2-6490-2384

E-mail address: kwon@uos.ac.kr (Won Tae Kwon).

크로 바늘을 제작하였다. 마이크로 방전가공은 가공 깊이가 깊어질수록 전극의 소모로 인해 생성되는 가공 칩의 배출이 어려워지기 때문에 일정한 깊이부터는 입구간극이 커지는 반면 가공 속도는 아주 느려진다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 1단계 가공을 진행한 구멍에 1단계 가공 때보다 지름이 작은 전극으로 2단계 가공을 진행하는 방법을 이용하였다. 그리고 2단계 가공을 한 바늘을 뒤집어 3단계 가공하는 방법을 이용하여 입구간극이 작으면서도 깊은 구멍을 가지는 마이크로 바늘을 제작하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 실험실에서 제작된 EDM 가공장치를 사용하였다. X, Y축과 Z축은 각각 고정밀 위치제어가 가능한 리니어 DC모터인 Dover사의 Trilogy LM-210이 사용되었고 컨트롤러로는 Compumotor CM233AX를 사용하였다. 각 이송축의 위치를 0.1 $\mu\text{m}/\text{cts}$ 의 분해능을 갖는 Heidenhain사의 LIP401A 엔코더를 사용하여 제어하였다. 또한 전극 회전을 통해 가공칩 배출을 하며, 높은 진원도 확보를 위해 주축시스템은 DC 서보모터에 정압공기 베어링을 사용하여 반경방향 회전 정밀도 0.05 μm 이내, 최대 회전수가 3,000 rpm인 Antimatics사의 Smartmotor 2315D DC brushless type을 사용하였다. 주축시스템은 DC 서보모터에 정압공기 베어링을 사용하여 반경방향 회전 정밀도 0.05 μm 이내, 최대 회전수가 3,000 rpm인 Antimatics사의 Smartmotor 2315D DC brushless type을 사용하였다. 방전 회로는 입력전압과 축전용량으로 단발 방전 에너지를 쉽게 조절할 수 있는 RC방전 회로를 선택하였다^[11]. 전극에 -전원을 연결하고 시편에 +전원을 연결하는 정극성 가공이 가공률도 높고, 전극 소모도 작게 나타나므로^[12] 모든 실험은 정극성으로 실험을 수행하였다. Fig. 1은 micro-EDM 시스템의 사진이다.

2.2 전극 및 구멍가공

본 연구에서는 전극을 가공하기 위하여 Block-EDM방법을 사용하였다. 사용할 옆면과 전극이 수평을 유지하도록 블록을 고정시킨 후 전극을 공칭반경에 방전여유를 더한 거리만큼 블록에서 떨어져 위치시키고 z축 방향으로 이송시키는 방법으로 원하는 반경의 전극을 제작하였다. 블록은 길이가 15 mm, 높이가 500 μm 이고 재질은 황동이며 전극은 길이 50 mm, 지름 300 μm 이고 재질은 WC이다. 절연액으로는 등유를 사용하였다. 등유를 절연액으로 사용하면, 전극의 길이 방향 마모가 탈이온수를 사용했을 때의 2배가 된다^[2]. 하지만 탈이온수를 절연액으로 사용하면 등유를 사용했을 때 보다 입구간극이 커지기 때문에 본 실험에서는



Fig. 1 Experimental set-up to manufacture micro-needle using micro EDM

미세구멍 가공이 용이한 등유를 사용하였다. 전극은 전극마모를 고려하여 1단계 가공 시에는 길이를 1,800 μm 로, 2단계 가공 시에는 2,400 μm 로 가공하였으며 3단계 가공 시에는 1단계 가공 시와 같은 길이로 가공하였다. 가공된 전극을 이용하여 길이가 2,300 μm , 직경이 300 μm 인 WC재질의 봉에 구멍을 가공하였다. RC회로에 입력되는 전압, 축전량, 저항, 스펴들의 회전수, 전극의 이송량을 세팅한 후 구멍을 가공하였다. 전극을 Z축 방향으로 아래쪽으로 이동하다가 전극의 끝점과 바늘 사이에 단락이 발생한 위치를 Z축 원점으로 설정하였다. 가공 중 전극의 Z축은 전극과 바늘 사이의 전압을 측정하여 단락 여부를 확인한 다음 전진과 후진을 반복하며 가공하였다. 가공 후 전극의 끝점을 다시 가공 중심에서 100 μm 이동한 후 가공이 되지 않은 평평한 바늘 표면에 단락시킨 후 Z축 원점과의 마모된 전극의 끝점의 상대적인 거리를 측정하여 전극의 길이방향 마모를 측정하였고 가공시간, 단락 수, 입구간극을 측정하였다.

2.3 2자유도 마이크로 바늘 공정부 설계

본 연구의 목적인 중공형 마이크로 바늘을 가공하기 위하여 바늘에 가공한 구멍의 입구와 출구가 일직선에 놓이도록 바늘의 각도를 조절할 수 있는 2자유도의 마이크로 바늘 고정부를 설계하였다. Fig. 2는 실제 제작한 2자유도의 마이크로 바늘 고정구이다. 바늘을 고정한 알루미늄판을 스테이지에 부착하고 스테이지의 a축, b축의 각도를 조절하면 바늘의 각도가 변하게 된다. 바늘은 집착체를 이용하여 고정부에 집착하였고, 2축 회전조정을 위

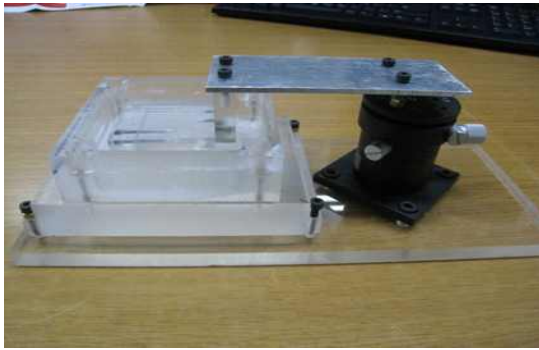


Fig. 2 Two degree of freedom fixture mechanism for micro needle manufacturing

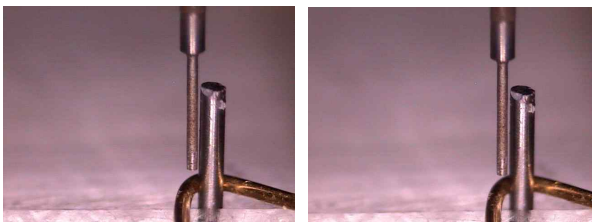


Fig. 3 Alignment of electrode and WC needle

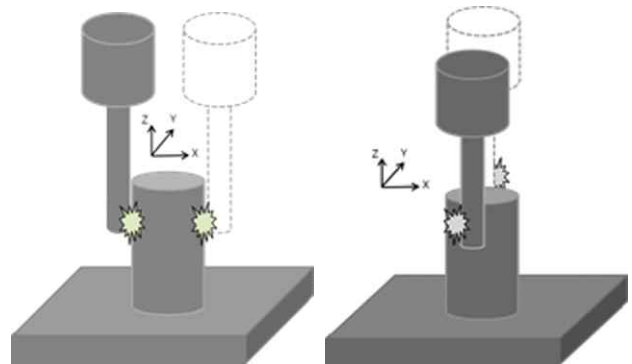
해 2축 회전 스테이지(RTS-2, Nam II Optical Components Corp.)를 이용하였다. EDM이 비접촉 가공이어서 힘이 가해지지 않으므로 접착제를 이용하여도 가공 중 진동 등의 문제가 발생하지 않았다.

2.4 전극과 바늘의 정렬

전극과 바늘이 정확하게 정렬되지 않으면 입구 구멍 위치와 출구 구멍 위치가 일직선에 놓이지 않는 현상이 발생하게 된다. 전극과 바늘의 평행도를 맞추기 위하여 2자유도 마이크로 바늘 고정구와 광학현미경을 이용하였다. Fig. 3은 전극과 바늘을 정렬하기 전과 후 사진이다. 왼쪽 사진에서 전극과 바늘의 간극이 일정하지 않고 윗부분이 더 벌어진 것을 볼 수 있다. 이는 전극과 바늘의 정렬이 이루어지지 않았다는 것을 나타낸다. 이런 경우 구멍 입구중심은 바늘의 중심과 일치하지만 출구중심은 바늘의 중심과 달라지는 결과가 나타난다. 오른쪽 사진은 2자유도의 마이크로 바늘 고정부를 이용하여 전극과 바늘을 정렬한 사진이다. 사진에서 전극과 바늘이 서로 평행하여 간극이 일정하게 조정되었다.

2.5 바늘의 홀 가공 중심의 결정

마이크로 바늘을 가공할 때 구멍을 바늘의 중심에 가공해야 한다. Micro-EDM은 방전을 이용한 비접촉 가공이기 때문에, 전극과 가공물이 단락되면 방전현상이 발생하지 않기 때문에 가공이 되지 않는다. 홀 가공 중심을 결정하는 방법으로는 전극과 바늘이 단락되면 통전되는 현상을 이용하였다. Fig. 4는 좌표를 결정하



(a) Determination of the center point of workpiece in x-coordinate (b) Determination of the center point of workpiece in y-coordinate

Fig. 4 Method to determine center points of the micro needle

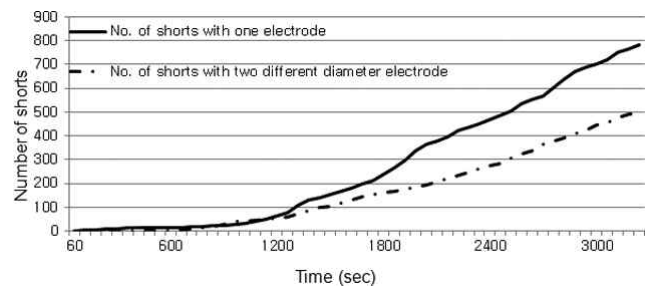


Fig. 5 Comparison of no. of shorts with one electrode and different diameter electrode

는 과정을 보여준다. x축 좌표를 결정할 때는 y축을 기준으로 전극을 바늘의 왼쪽과 오른쪽에 접촉시켜 각각 단락이 일어나는 x 좌표를 찾은 후 중심좌표를 계산하였다. 마찬가지로 y축 좌표를 결정할 때는 x축을 기준으로 전극을 바늘의 앞쪽과 뒤쪽에 접촉시켜 각각 단락이 일어나는 y 좌표를 찾아 중심좌표를 계산하였다.

2.6 3단계 가공을 이용한 깊은 구멍 가공

EDM은 구멍 가공 깊이가 깊어질수록 가공 칩의 배출이 어려워 전극의 이송속도가 떨어지고, 진입위치에서는 전극 끝에서 배출되는 가공 칩과 측면 벽면 사이에 2차 방전이 일어나 구멍 직경을 더욱 확장시킨다. 이런 이유로 단순히 전극의 길이와 가공시간을 늘리는 것으로만 가공깊이를 늘리는 것은 한계가 있다. 마이크로 바늘의 가공 방법을 결정하기 위한 선행실험을 실시하였다. 바늘을 1개의 전극으로 가공했을 때와 2개의 전극으로 가공했을 때의 차이를 알기 위하여 실험하고 이때의 쇼트 수와 z방향 위치를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 도시하였다. 실험은 3번 시행하였으며 그 평균 값을 도시하였다. 이 그림에서 실선으로 된 그래프는 1단계 가공, 즉 1개의 전극만으로 평균 3,240초 가공한 결과이고 점선으로 된 그래프는 1단계 가공을 평균 1,320초 시행한 후 2단계 가공을 평

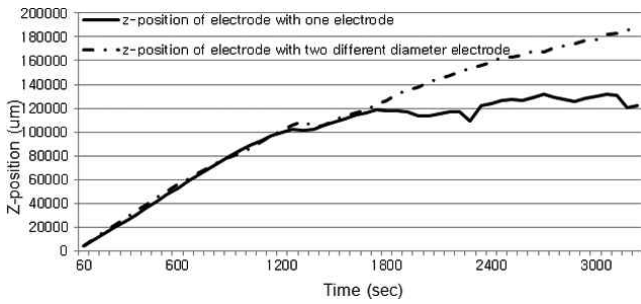


Fig. 6 Comparison of no. of z-position with one electrode and two different diameter electrode

Table 1 Result of machined micro-hole for 1,320 and 3,210 seconds, respectively

Machining time (sec)	Diameter of electrode (mm)	Entrance clearance (mm)	Depth of hole (mm)	Electrode wear (mm)
1,320	105	27.9	842	403
3,120	105	41.5	882	604

균 1,920초 진행한 결과의 그래프이다. 1단계 가공을 중지하고 2단계 가공을 시작한 기준은 쇼트 수의 갑작스런 증가로 하였으며, 이 기준은 실험마다 차이가 있기 때문에 실험하면서 결정해야 한다. 지름이 105 μm인 전극으로 각각 1,320초, 3,120초 동안 가공을 한 후 입구 간극, 가공깊이, 전극마모를 Table 1에 비교하였다. 가공깊이는 1,320초 가공 시 842 μm이고 3,120초 가공 시 882 μm로 그 차이는 40 μm에 불과하였다.

반면에 전극 마모는 1,320초 가공 후에는 403 μm이고 3120초 가공 후에는 604 μm로 거의 200 μm 정도 차이가 났다. 그리고 입구 간극을 볼 때 1,320초 가공 후에는 입구 간극이 27.9 μm이었고 3,120초 가공 후에는 41.6 μm로 거의 13.7 μm 정도 차이가

났다. 즉 같은 지름의 전극으로 각각 1,320, 3,120초 가공 하였을 경우 가공깊이는 큰 차이가 없지만 3,120초 가공하였을 때가 1,320초 가공했을 때보다 입구 간극과 전극 마모량은 1.5배정도 증가하였다. 이는 가공 시간과 가공 깊이가 증가함에 따라 발생하는 칩배출의 어려움과 2차방전 때문으로 이는 깊은 구멍의 가공을 어렵게 한다.

본 연구에서는 가공 깊이를 증가시키기 위하여 총 3단계의 가공 과정을 거쳐 마이크로 바늘을 제작하였다. 우선 지름이 105 μm인 전극으로 1단계 가공을 20분정도 진행하고, 1단계 가공 때보다 약 15 μm정도 작은 지름의 전극으로 2단계 가공을 진행한다. 그리고 2단계 가공을 마친 바늘을 뒤집어 다시 지름이 105 μm인 전극으로 3단계 가공을 진행하여 바늘을 제작하기로 결정하였다. 선행실험결과 1단계 가공은 1,200~1,800초 정도까지만 하고 정확한 중단 시간은 쇼트수가 갑자기 증가할 때로 결정하였다.

2.7 가공 조건

Table 2는 1단계, 2단계, 3단계 가공의 가공조건을 나타냈다. 1단계 가공에서는 전극 지름이 105 μm이고 길이가 1,800 μm인 WC재질의 전극을 사용하였고 바늘도 WC재질을 사용하였다. 실험에서 입력 전압은 100 V, 축전용량은 300 pF, 충전부 저항은 500 Ω, 전극 이송속도는 1.5 μm/s, 스피들 회전속도는 2,900 rpm으로 설정하였다. 2단계 가공은 1단계 가공과 거의 유사한 가공 조건에서 실험을 진행하였다. 단, 2단계 가공 시에는 전극의 지름을 1단계 가공 때 보다 15 μm 작은 90 μm인 전극을 사용하였고, 전극의 길이는 1단계 가공에서 이미 가공한 깊이를 고려하여 2,400 μm인 전극을 사용하였다. 2단계 가공은 1단계 가공을 1,500 s 진행한 후에 같은 위치에 계속 실행하였다. 3단계 가공은 1단계 가공과 같은 조건에서 진행하였다. 3단계가공은 1단계 가공

Table 2 Manufacturing conditions

		1st machining process	2nd machining process	3rd machining process
Electrode	Material	WC	WC	WC
	Diameter (μm)	105	90	105
	Length (μm)	1800	2400	1800
Work piece	Material	WC	WC	WC
Dielectric fluid	Kerosene			
Experimental condition	Voltage (V)	100	100	100
	Capacitance (pF)	3000	3000	3000
	Resistance (Ω)	500	500	500
	Tool rotational speed (rpm)	2900	2900	2900
	Feed rate (μm/s)	1.5	1.5	1.5

을 1,500초, 2단계 가공을 2,520초 동안 진행한 후, 바늘을 뒤집어 계속 가공하였다.

3. 실험 결과

3.1 1단계 가공의 실험 결과

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 1단계 가공을 1,500초 진행한 후의 쇼트 수와 전극의 z 방향 위치를 나타낸다. Fig. 7을 보면 1,440초까지는 쇼트 수의 증가 없이 가공이 진행되다가 1,500초 경에 쇼트 수가 10으로 증가 하였는데, 이때 1단계 가공을 중단하였다.

3.2 2단계 가공의 실험 결과

2단계 가공은 1단계 가공 때 보다 15 μm 작은, 90 μm 지름의 전극으로 진행하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 2단계 가공의 쇼트 수와 전극의 z 방향 위치의 그래프이다. 2단계 가공은 2,520초 동안 진행하였다. Fig. 9에 나타났듯이 2단계 가공 중 쇼트 수가 선형적으로 증가하고 특별한 쇼트수의 점프가 없었으나 선행실험 결과인 3,240초를 훨씬 넘었으므로 4,020초에 중지하였다. 1단계 가공과 2단계 가공을 진행한 후, 바늘을 뒤집어 3단계 가공을 실행하였다.

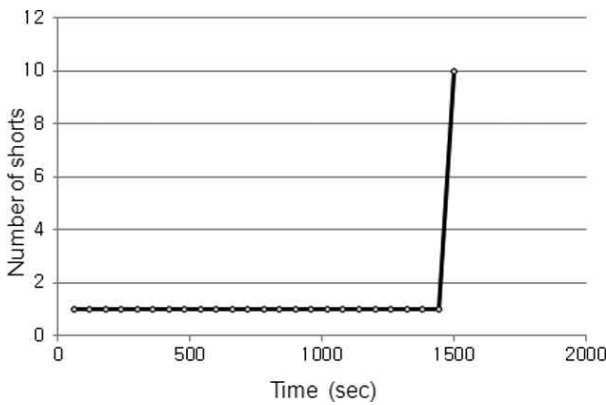


Fig. 7 Number of shorts of 1st manufacturing process

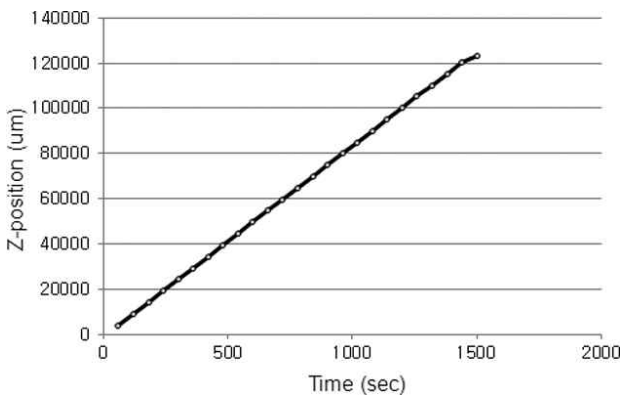


Fig. 8 Z-position of 1st manufacturing process

3.3 3단계 가공의 실험 결과

3단계 가공은 1320초 동안 진행하였다. 3단계 가공의 쇼트 수와 전극의 z 방향 위치는 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 800 초 때에 쇼트 수가 10까지 증가한 후 다시 쇼트수의 증가 없이 가공이 진행되다가 1,320초에 홀 가공이 되어 가공을 중단하였다. 전극의 z 방향 위치도 800초에서 잠시 뒤로 물러났다가 다시 가공이 잘 진행된 것을 볼 수 있다.

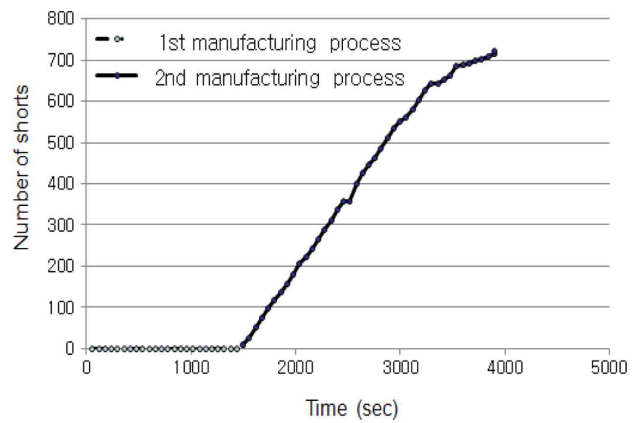


Fig. 9 Number of shorts of 2nd manufacturing process

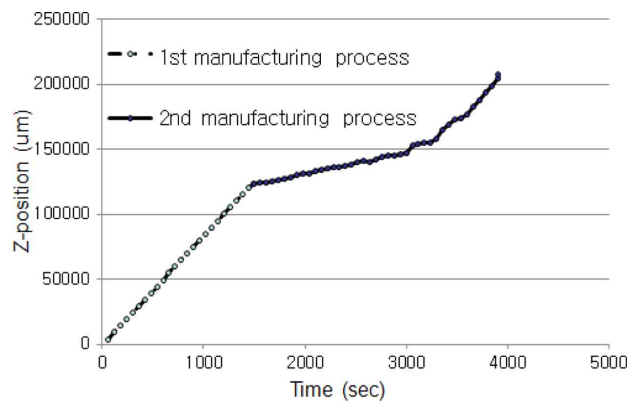


Fig. 10 Z-position of 2nd manufacturing process

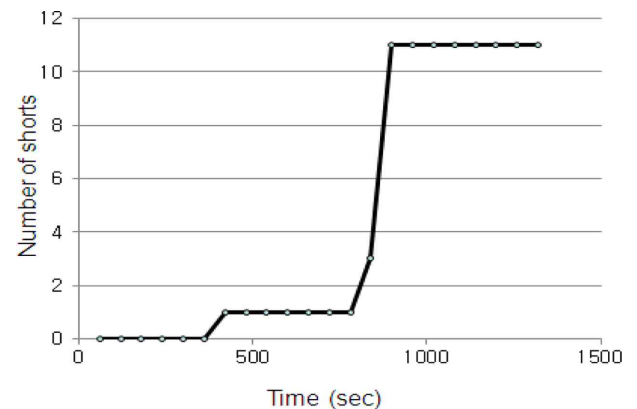


Fig. 11 Number of shorts of 3rd manufacturing process

Table 3 Experimental result

	Forward direction manufacturing		Reverse direction manufacturing
	1 st machining process	2 nd machining process	3 rd machining process
Machining time (sec)	1500	2520	1320
Length of electrode (μm)	1800	2400	1800
Diameter of electrode (μm)	105	90	105
Entrance clearance (μm)	-	131.4	130.2
Electrode wear (μm)	390	201	403
Hole depth (μm)	845	615	842
Number of shorts	10	1307	71
Length of needle (μm)	2302		

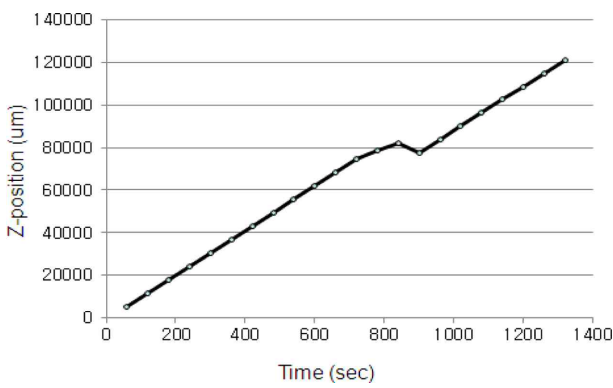


Fig. 12 Z-position of 3rd manufacturing process

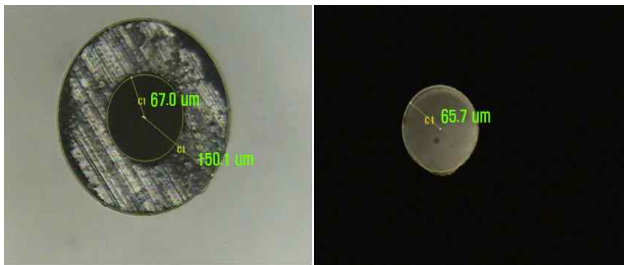


Fig. 13 The picture of the hole after 1st & 2nd machining process



Fig. 14 The picture of the hole after 3rd machining process



Fig. 15 Manufactured microneedle

3.4 중공형 마이크로 바늘의 제작

Table 3은 1, 2, 3 가공을 이용하여 바늘을 가공한 가공 결과를 나타낸 것이다. 1단계 가공 시에 길이가 1,800 μm 이고 지름이 105 μm 인 전극을, 2단계 가공 시에는 길이가 2,400 μm 이고 지름이 90 μm 인 전극을, 3단계 가공 시에는 길이가 1,800 μm 이고 지름이 105 μm 인 전극을 사용하였다. 가공 결과로는 입구 간격은 1단계, 2단계 가공을 진행 한 후 131.4 μm , 3단계 가공을 진행 한 후 130.2 μm 이었고, 전극의 마모량은 1단계 가공에서 390 μm , 2단계 가공에서 201 μm , 3단계 가공에서는 403 μm 이었다. 가공 깊이는 1단계 가공에서 845 μm , 2단계 가공에서 615 μm , 3단계 가공에서 842 μm 가공하여 총 길이가 2,300 μm 인 WC재질의 강도

높은 중공형 마이크로 바늘을 제작하였다. Fig. 13은 1, 2단계 가공방향의 바늘 입구 사진 및 아래서 빛을 통과시켰을 때의 사진이고 Fig. 14는 3단계 가공 후의 바늘 입구 사진 및 아래서 빛을 통과시켰을 때의 사진이며 Fig. 15는 가공한 바늘의 전체 사진이다.

4. 결론

본 연구에서는 Micro-EDM공정을 이용하여 높은 경도의 WC 재질의 마이크로 바늘을 제작하였다. 2축 회전 스테이지를 이용하여 바늘의 각도를 조절 가능한 2자유도의 바늘 고정 부를 설계하고 제작하였다. 그리하여 바늘의 고정을 용이하게 하였고 바늘의 고정

각도를 조절함으로써 전극각도를 조절함으로써 전극과 바늘을 정렬하였다. 마이크로 바늘의 홀 가공 중심의 오차범위를 5 μm 이하로 조절하면서 1, 2단계 가공 후 바늘을 뒤집어 가공하여 구멍을 일직선으로 유지하였다. 또한 3단계 가공을 진행함으로써 세장비의 극대화하였다. 깊은 구멍을 가공하기 위하여 지름이 105 μm 인 전극으로 1단계 가공을 하고 지름이 90 μm 인 전극으로 2단계 가공을 한 결과 2단계 가공 시에는 입구간극을 그대로 유지하면서 가공 깊이를 늘렸다. 1단계, 2단계, 3단계 가공을 진행하여 외경이 300 μm 이고 내경이 130 μm 이며 길이가 2,300 μm 인 WC재질의 높은 경도를 가지는 마이크로 바늘을 제작하였다.

후 기

이 논문은 2016년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 지원되었음.

References

- [1] Lee, J. A., Lee, S. W., Park, S. I., Lee, S. S., Lee, K. C., 2010, Fabrication of Carbon Microneedle Arrays with High Aspect Ratios and The Control of Hydrophobicity of These Arrays for Bio-Applications, J. Kor. Soc. Mech. Eng., 34:11 1721-1725.
- [2] Lee, K., Lee, H. C., Lee, D., Jung, H., 2010, Drawing Lithography: Three-Dimensional Fabrication of an Ultrahigh-Aspect-Ratio Microneedle, J. Adv. Mater., 22:4 483-486.
- [3] Cho, P. J., 2003, Characteristics of RC circuit with Transistor in Micro-EDM, A Thesis for a Doctorate, Seoul National University, Republic of Korea.
- [4] Jung, J. H., Kwon, W. T., 2010, Optimization of EDM for multiple performance characteristics using Taguchi method and Grey relational analysis, J. Mech. Sci. Tech, 24:5 1-6.
- [5] Masuzawa, T., Fujino M., Kobayashi, K., 1985, Wire Electro-discharge grinding for Micro-machining, Ann CIRP, 34:1 431-434.
- [6] Masuzawa, T., Kuo, C. L., Fujino., M., 1994, A Combined Electrical Machining Process for Micro Nozzle Fabrication, Ann CIRP, 43:1 189-192.
- [7] Yu, Z. Y., Masuzawa, T., Fujino., M., 1998, Micro-EDM for Three-dimensional Cavities-development of Uniform wear method, Ann CIRP, 47:1 169-172.
- [8] Kuo, L., Masuzawa, T., 1991, A Mirco-pipe fabrication process, Proc. IEEE MEMS, 91 80-85.
- [9] Allen. D. M., Lecheheb., A., 1996, Micro Electro-discharge Machining of Ink Jet Nozzle: Optimum Selection of Material and Machining Parameter, J. Mater. Proc. Tech., 58 53-63.
- [10] Liu, H. S., Yan, B. H., Chen, C. L., Huang, F. Y., 2005, Application of Micro-EDM combined with high-frequency dither grinding to micro hole machining, Int. J. Mach. Tool. Manuf., 46 80-97.
- [11] Jahan, M. P., Wong, Y. S., Rahman, M., 2009, A Study on the Quality Micro-hole Machining of Tungsten Carbide by Micro-EDM Process Using Transistor and RC-type pulse Generator, J. Mater. Proc. Tech., 209:4 1706-1716.
- [12] Kim, G. M., Kim, B. H., Chu, C. N., 1999, Machining Rate and Electrode Wear Characteristics in Micro-EDM of Micro-hole, J. Kor. Soc. Prec. Eng., 16:10 94-100.