

보이스코일 액츄에이터로 이송되는 미세구멍 가공용 방전 가공기의 작동특성 연구

양승진*, 백형창**, 김병희***, 장인배***

A Study on the Performance Evaluation of a Voice Coil Actuator for Electro-Discharge Micro-Drilling Machine

Seung Jin Yang*, Hyeong Chang Back**, Byeong Hee Kim*** and In Bae Chang***

ABSTRACT

In this paper, we have developed an electro discharge machine for micro drilling driven by a voice coil actuator. Because the voltage signal of the electro-discharging circuit shows a lot of peaks and valleys, the active type low-pass filtering technique is adopted to get the average of the signal. Since the motion of the voice coil is precisely controlled by the error value between the object voltage value and the measured one, it is possible to prevent the mechanical contact between the rotating electrode and the workpiece and to maintain the appropriate machining conditions during the process. The electro-chemical machining technology was also adopted to make small diameter electrodes. Pure water is used as a dielectric. The machining procedure is performed to verify the feasibility of the developed system. It takes about 10 seconds to drill the $\phi 100 \mu m$ hole to the $100 \mu m$ thickness stainless steel plate. The machining time depends on the values of the resistor and the capacitor. There may exist the optimal values of time constant and the tendency is displayed in the appendix.

Key Words : Electro-discharge machining (방전가공), Micro-drilling (미세구멍가공), Voice-coil actuator (보이스 코일 액츄에이터), Electro-chemical machining(전해가공), Micro-electrode (미세전극)

1. 서론

최근들어 초소형 기계부품 시장은 급속하게 성장하고 있으며, 이러한 미세가공기술은 경박,소형화 제품에 응용되어 가전, 통신관련 제품에서 가격 경쟁력의 핵심을 이루고 있다. 에칭이나 레이저, 마이크로드릴 및 방전 등의 가공기술을 이용한 미세가공기법을 이용하여 초정밀 제품을 생산하는데는 아직 기술적인 제약들이 많으며, 특히 생산성의 측면에서 많은 문제점을 안고있기 때문에 현재의

기술수준으로는 극히 제한된 범위 내에서 응용되고 있는 실정이다. 미세 구멍 가공기술은 섬유 방사노즐이나 터빈 엔진의 노즐에 적용되기 시작하여 잉크젯트 노즐, 광통신용 광학 부품 등에서 용도가 점차로 늘고있다.

미세구멍의 가공은 국내에서도 이미 다양한 연구진에 의해서 수행되고 있는 실정이며, 김규만^(1,2)은 와이어 방전 연삭기법을 사용하여 미세전극

접수 2001년 5월 8일

* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 대학원

** 홍천직업훈련원 치공구설계과

*** 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

을 성형한 후 이를 미세구멍 가공용 방전가공에 적용하여 10 μm 규모의 미세구멍 가공에 성공하였다. 윤재웅⁽³⁾은 화학적 에칭 기법을 사용하여 미세 전극을 성형한 후 이를 사용하여 미세구멍 방전가공을 수행하였다.

방전 기법을 사용하여 미세 구멍을 가공하기 위해서는 가공된 칩이 원활하게 배출될 수 있도록 전극을 회전시켜야만 한다. 그럼에도 불구하고 칩에 의해 단락이 발생하면 가공면에 버닝현상이 발생하며, 전극이 급격하게 소모되므로 이를 방지하기 위하여 전극을 뒤로 후진시켜야 한다. 그런데, 기존의 미세구멍 가공용 방전 가공기는 일반적인 리니어 가이드와 리니어 모터를 기반으로 하는 이송 시스템을 사용하기 때문에 자체 관성이 매우 커, 전류 모니터링 결과 단락이 발생한다 하여도 전극을 즉시 뒤로 후진시키지 못하는 단점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위해서는 관성이 작은 이송 서보 시스템을 구축하여야 하는데, 보이스코일은 이러한 목적에 매우 적합한 작동기 요소로 최근 들어 미세 가공 및 마이크로 위치제어 분야에서 널리 사용되고 있는 작동기 요소이다⁽⁴⁾. 이준우⁽⁵⁾는 로렌츠(Lorentz)력을 이용한 차동형 보이스코일 액추에이터를 직선이송 시스템에 적용하여 미세 위치제어의 신뢰성을 검증한 바 있다.

본 연구에서는 방전 가공용 주축 시스템을 장착한 크로스 롤러 베어링으로 지지되는 소형 직선 이송 테이블의 이송을 위하여 보이스코일 액추에이터를 사용하였다. 또한, 구멍 가공 시 발생하는 방전 전압의 변화를 모니터링하여 이를 근거로 하여 보이스코일 액추에이터를 구동함으로써, 항상 균일한 방전조건을 유지할 수 있는 모니터링 및 서보 시스템을 구축하였다. 이 시스템을 기반으로 하여 다양한 가공조건에 따른 가공시간 및 가공면의 상태를 관찰함으로써, 방전전압 모니터링과 보이스코일 액추에이터를 사용한 미세구멍 가공기용 서보 시스템의 구현 가능성을 타진해 보는 것을 본 연구의 목적으로 하고 있다.

2. 본론

2.1 방전시스템

방전 가공은 절연액 내에서 전극과 공작물 사이에 전압을 인가한 후 두 전극을 접근시킬 때 발생하는 방전현상을 통하여 공작물을 제거하는 가공

방법이다. 그러나 미세 방전가공에서는 일반적인 방전 가공에 비하여 1/100 정도로 방전 에너지(약 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{J}$)를 줄여 단발 방전에 의한 제거량을 작게 하고, 대신 펄스 폭을 작게 하여 주파수를 높임으로서 가공속도를 빠르게 한다. 본 연구에서는 RC 방전 회로를 사용하였으며, 주어진 이송 서보 시스템에 적합한 최적의 방전조건을 도출하기 위하여 다양한 조합이 가능하도록 저항 및 커패시터 배열을 구성하였다. 이에 따라서 다양한 종류의 시정수 조합이 가능해지며, 동일한 시정수에 대하여도 전류조건을 변화시킨 조합이 가능하게 되었다.

방전 회로는 Fig. 1과 같이 구성하였다. 입력 전압으로는 48V DC 전원 공급기를 사용하였으며, RC 회로로 방전을 촉발시킨다. 이 저항들은 고전력 하에서 사용되므로 100W 용량의 권선형 저항을 사용하였다. 방전 전압을 모니터링 하기 위해서는 방전 전압을 전압 분할기를 사용하여 작동 증폭기가 수용할 수 있는 범위의 전압으로 낮추어야만 한다. 본 논문에서는 11:1의 전압 분할기를 사용하여 방전 전압을 0~4 V의 전압신호로 낮추었으며 1차 버터워스(Butterworth) 저역통과 필터를 사용하여 방전 발생시 촉발되는 고주파 노이즈 성분을 제거하였다.

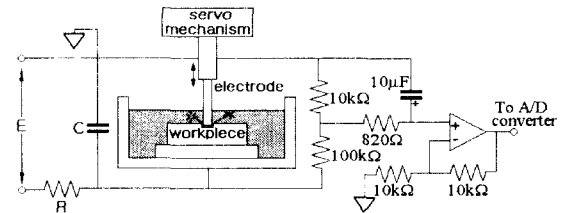


Fig. 1 RC discharging and monitoring circuit for micro EDM

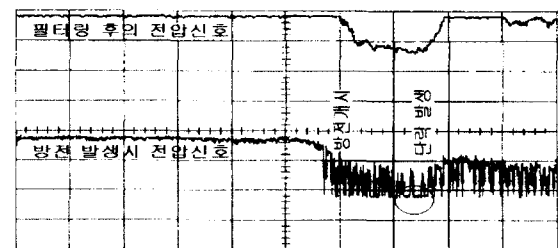


Fig. 2 Variations of gap voltage according to discharging condition

Fig. 1의 우측 RC 회로는 방전 가공 시 발생하는 전압의 변화를 감지하기 위한 모니터링용 회로이다. 방전 가공 시에 발생하는 전압은 채터링 현상처럼 매우 급격한 전압 변화를 수반하므로, 이 전압변화를 모두 모니터링하여 가공상태를 판단하는 것은 매우 어려우며 복잡한 필터링 알고리즘을 필요로 한다. 그런데, 방전 발생 시 나타나는 전압 변화 특성은 Fig. 2에서와 같이 일정한 패턴을 보이므로 이를 토대로 하여 효과적인 방전 모니터링 시스템을 구축할 수 있다. Fig. 2에서 출력 전압이 high(48V 근처)인 경우는 전극과 공작물이 떨어져 있는 경우이며, 출력전압이 low(0V 근처)인 경우는 전극과 공작물이 단락된 경우이다. 전극과 공작물이 방전 가공에 적합한 간극상태를 유지하게 되면 그림의 우측단에서와 같이 펄스형의 방전 전압 변화가 나타나게 된다. 전극과 공작물의 사이가 비교적 먼 상태에서 방전 현상이 발생하게 되면 변화하는 전압의 평균값은 높게 나타나며, 이와 반대로 전극과 공작물의 사이가 비교적 가깝다면 전압의 평균값은 낮게 나타나게 된다. 그러므로, 전압의 평균 변화값을 구하면, 전극과 공작물 사이의 거리를 알 수 있으며, 이를 토대로 하여 이송 서보 시스템을 구동하면 미세 구멍 가공에 적합한 최적의 간극 상태를 유지하며 방전 가공을 수행할 수 있으며, 방전 가공에 소요되는 시간을 최소화 할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 1의 우측에 구성된 버터워스 저역통과 필터를 사용하여 방전 전압을 평균화시킨 후 이를 모니터링하여 보이스코일 구동을 위한 비교전압으로 사용하였다.

2.2 보이스코일 액츄에이터

보이스 코일 액츄에이터(voice coil actuator)는 비교적 짧은 이송거리를 필요로 하는 정밀 직선운동 시스템을 구동하기에 적합한 직선 이송형 작동기로, 영구자석에 의한 정적인 자기장 내에서 코일의 유도자기력이 생성하는 로렌츠력(Lorentz force)을 운동 에너지로 사용한다. 이러한 보이스 코일 액츄에이터는 하드디스크나 광디스크 내에서 픽업헤드의 이송과 같은 초정밀 직선이송 시스템에 사용되면서 그 사용분야가 비약적으로 증가하였다. 근래에 들어 미세 가공 기술에 대한 관심이 높아지면서 소형 직선운동 시스템을 사용한 위치결정 시스템들이 미세 가공기용 테이블 및 가공용 헤드의 이송 시스템으로 채용되기 시작하였다^(5,6). 보이스

코일 액츄에이터는 철심을 사용하지 않기 때문에 자체 관성력이 낮아 전극과 공작물 사이에 단락이 발생하였을 때 고속으로 전극을 후진시키기가 용이하며, 특히 보이스코일은 전류 비례요소이므로 선형 서보계의 구축이 용이하다는 장점이 있어 기존 리드 스크류 타입 구동계에 비해 구조가 단순하고 크기가 작으면서도 높은 기동성을 갖는 이송시스템을 구성할 수 있다.

본 논문에서 적용한 보이스코일 액츄에이터는 Fig. 3에서와 같이 E형 강재 코어 내측에 두 개의 NdFe-B 영구자석을 설치하여 정적인 자기장을 형성한다⁽⁴⁾. 영구자석의 자기장 전향경로 상에 설치된 철심이 자기장을 흡수하여 폐경로를 형성하기 때문에 자기장의 경로 중에 공극의 위치에 있는 전자석 코일은 로렌츠력을 생성할 수 있는 조건을 갖추게 된다. 코일이 감겨져 있는 알루미늄 보빈은 크로스 롤러 베어링으로 지지된 이송 테이블의 한 쪽 측면에 설치되어 직선이송을 수행하게 된다.

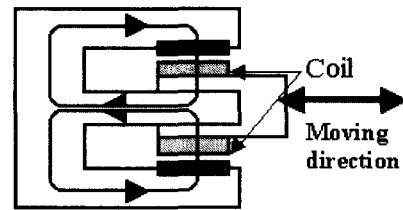


Fig. 3 Configuration of E shaped voice coil actuator for linear motion

액츄에이터 이송 거리의 한계는 E형 코어의 크기와 이송부의 코일 크기, 그리고 계자 내부에 부착된 영구자석의 크기에 의해 결정이 된다. 본 논문에서는 최대 이송거리를 15mm로 설계하였으며, 위치 피드백을 위한 선형스케일의 분해능은 50nm 이고, 이송부인 사각 권선형 코일은 단면이 25×25 mm 인 사각형 알루미늄 코일에 각각, 길이 20 mm 의 영역 내에 $\phi 0.35$ mm 인 에나멜 코팅 동선을 300회 감아 성형하였다.

이때 공극에서의 자속밀도는 다음과 같이 나타난다.

$$B_g = \frac{B_r}{\left[\frac{A_g}{A_m} + \mu_r \frac{g}{l_m} \right]} \quad (1)$$

영구자석의 자속을 $B_r = 1.2$ [Tesla]로 가정했을 때 공극 내에서의 자속밀도 B_g 는 0.378 [Tesla]임을 알 수 있다. 코일의 인덕턴스는 Fig. 4와 같은 등가회로에 대하여 다음 식으로 구할 수 있다⁽⁵⁾.

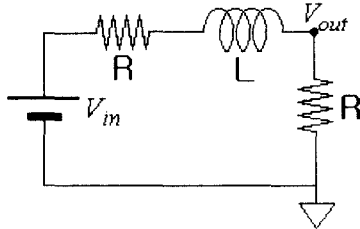


Fig. 4 Equivalent RL circuit for coil

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = V \quad (2)$$

여기서 보이스코일에 일정한 전압을 공급해 주면 전류는 다음과 같이 지수함수로 표현된다.

$$i(t) = \frac{V}{R} (1 - e^{-(\frac{R}{L})t}) \quad (3)$$

이에 따라 보이스코일 액추에이터가 생성하는 이송력은 코일의 권선수(N)에 비례하며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = N \cdot B \cdot i \cdot l \quad (4)$$

여기서 l 은 자계 내에 위치한 도선의 폭을 의미한다.

2.3 구멍 가공용 방전기 시스템의 구축

본 논문에서 구축한 구멍 가공용 방전 시스템은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 모터, 커플링, 아이들스핀들 및 자콥슨 척으로 주축계가 구성되어 있다. 주축 구동용 모터는 MAXON-118778 모터로 최대 회전속도는 8,200rpm이며 아이들스핀들과는 다이아프램식 유연 커플링으로 연결된다. 자콥슨 척은 아이들스핀들 선단부에서 테이퍼로 연결되는데, 현합가공을 통하여 $1 \mu m$ 이내의 회전정밀도를 갖

도록 조립하였다.

크로스롤러 베어링으로 가이드되는 테이블과 보이스코일 액추에이터가 선형 모션 시스템을 구성하고 있다. 보이스코일 액추에이터의 위치결정 정밀도는 50nm 범위까지 제어가 가능하며 반복정밀도는 선형 가이드의 정밀도에 지배를 받는다⁽⁵⁾. Fig. 1에 도시된 저역 통과 필터와 A/D 변환기 및 마이크로 프로세서로 이루어진 모니터링 시스템에서 계측된 전압값을 토대로 하여 보이스코일에 가할 전류값을 적분 알고리즘을 통하여 결정하고 이를 전류 증폭기로 출력하여 보이스코일을 구동한다. 기계의 작동을 모니터링 및 제어하기 위하여 PIC 마이크로 프로세서를 사용한 독립형 제어를 구축하였다. 저항과 커패시터들은 모두 로터리 스위치에 연결하여 다양한 종류의 RC조합이 가능하도록 구성하였다. 방전 가공시 방전액으로는 정수된 물을 사용하였으며 한 번 사용한 물은 드레인을 통하여 배출하고 새로운 물은 정량펌프를 사용하여 일정한 비율로 공급하였다. Fig. 6에서는 방전 가공기 전체 시스템의 구성을 보여주고 있다.



Fig. 5 Electro discharging machine for micro hole



Fig. 6 EDM system for micro hole drilling

3. 실험 및 분석

3.1 전해가공에 의한 미세전극의 제작

전극의 미세 가공을 위하여 전해가공(ECM)의 기법을 적용하였다. 전극의 전해 가공을 위한 전해질 용액(electrolyte)으로는 10wt%의 NaOH 수용액을 사용하였으며, Fig. 1의 방전 가공기 내에서 전극과 가공물 사이의 극성만을 반전시킨 상태에서 전해부식과정을 진행시켰다. 이때, RC조합에 따라 전극의 부식정도가 변화하는데, $R=500\Omega$, $C=0.01\mu F$ 정도에서 가장 양호한 형상의 전극을 가공할 수 있었다. 또한, 전극을 정지시킨 상태에서 전극을 가공하면 가공속도는 향상되지만 전극의 동심이 어긋나는 경우가 자주 발생한다. 반면에 전극을 연속적으로 회전시키며 가공하면 전극의 가공시간이 급격하게 증가하는 현상이 발생하였다. 이를 극복하기 위하여 본 연구에서는 전극을 약 30초 간격으로 2~3초간 회전시키는 방법을 사용하여 황동재질 전극의 경우 약 2분~2분30초 이내에 Fig. 7과 같이 $30\mu m$ 정도의 동심도가 양호한 전극을 성형할 수 있었다. 그런데, 황동 재질의 전극은 미세 방전시 발생하는 폭발압력에 비해 전극의 강성이 약해 텅스텐 재질의 전극과는 달리 수십 마이크론 범위의 구멍 가공에는 사용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서의 가공실험은 황동 전극이 안정적으로 방전가공을 수행할 수 있는 직경범위인 약 $150\mu m$ 직경을 전극조건으로 선택하였다. 향후 전극강성이 강한 텅스텐 전극의 가공을 통한 미세 구멍 가공 연구를 수행할 예정이다.

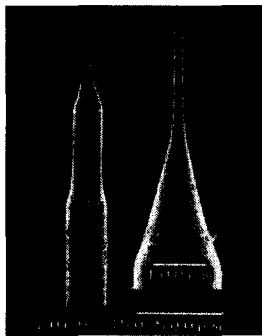


Fig. 7 Machined micro electrodes(brass)

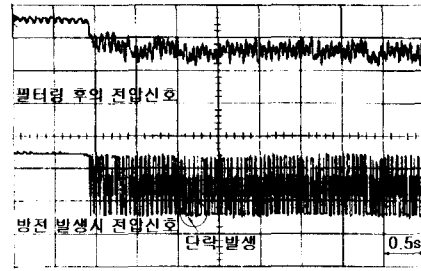


Fig. 8 Variations of gap voltage according to the voice coil servo

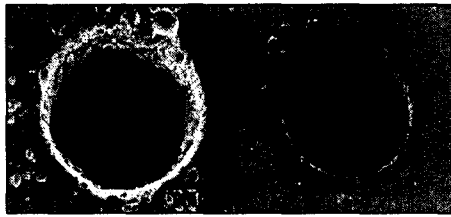
3.2 전압신호의 필터링

방전 전압을 모니터링하여 이를 근거로 보이스코일을 이송하면 전극과 공작물 사이의 단락 발생을 최소화시켜 항상 최적의 방전 조건을 유지할 수 있으므로 방전가공에 소요되는 시간도 줄일 수 있다. 보이스코일 서보를 수행하는 도중에 모니터링된 방전 전압의 변화를 Fig. 8에서 도시하고 있는데, 이를 서보제어가 수행되지 않은 경우의 결과인 Fig. 2에서의 결과와 비교해 보면 보이스코일은 전극과 공작물 사이의 상대 간격을 항상 일정하게 유지시킬 수 있다. 이 간격조건은 능동형 필터로 평균화한 전압에 비례하는 양이므로 서보제어의 목표전압의 수정을 통하여 전극과 공작물 사이의 간격과 그에 따른 가공상태 및 가공시간 등을 능동적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 8에서도 필터링 전/후의 전압 신호를 살펴보면 단락 발생시 전극이 후진함에 따라 필터링 후의 전압신호가 변화하는 양상을 관찰할 수 있다.

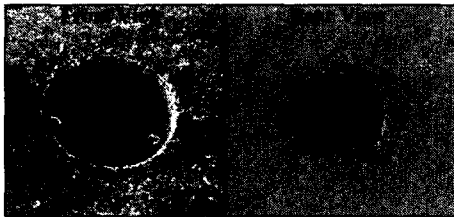
3.3 미세구멍가공 결과분석

Fig. 9는 전해부식법으로 가공된 고속도강 전극과 황동 전극을 사용하여 두께 0.1mm인 스테인레스 강판에 미세구멍을 가공한 결과를 보여주고 있다. 전극의 직경은 $150\mu m$ 이며, 가공조건은 다양한 실험 결과를 토대로 가공속도와 가공면 정밀도 면에서 양호한 가공결과를 보인 $R=200\Omega$, $C=0.01\mu F$ 로 설정하였다. Fig. 9 (a)는 고속도강에 의한 구멍가공 결과로 공구마모로 인한 테이퍼 정도는 적었으나 불안정한 방전으로 인해 표면 거칠기가 악화되고 직경의 확대가 클 뿐만 아니라 버닝현상이 일어나는 것이 관찰되었다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 고속도강은 미세 방전용 공구로는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 한편 Fig. 9(b)

는 황동 전극에 의한 미세방전 결과로 안정된 방전이 발생하여 균일한 방전흔이 발생하고 표면거칠기도 상당히 양호하였으나 황동전극의 특성 상 전극의 빠른 마모로 인해 진입부와 진출부의 직경차이가 크게 발생하는 특성을 보였다. 황동에 의한 미세방전은 미세 다이의 구성이나 강제적인 테이퍼가공에 적합한 가공법으로 여겨지나 구멍의 진직도가 중요한 가공일 경우에는 황동전극보다는 상대적으로 전극소모가 적은 초경이나 텅스텐 전극을 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.



(a) 150 μm , HSS electrode



(b) 150 μm , brass electrode

Fig. 9 Machined micro-holes

한편 다양한 미세구멍의 방전가공을 수행해 본 결과 방전전압에 의한 간극제어를 수행할 경우 방전가공의 종료시점을 알려주는 지표가 명확치 않았다. 본 논문에서는 방전 가공기의 수조 기저면에 거울을 설치하고 방전 가공중에 이를 관찰하다가 방전 불꽃이 거울에 반사되면 구멍이 성형된 것으로 판단하며, 이후 일정 시간동안 보이스코일에 가해지는 전압의 증가를 관찰하다가, 일정 비율 이상 증가하면 구멍의 가공이 완료된 것으로 판단하였다. 그런데, 미세구멍의 방전 시 구멍이 뚫리는 순간에 방전 발생 형태는 구멍이 성형되기 직전과는 다른 양상을 보이므로 보이스코일 서보의

전압 모니터링만으로는 구멍 가공의 종료를 명확하게 판단하기 어렵다. 이를 극복하기 위해서는 전극을 가공물 두께의 두 배 이상으로 이송하여 구멍 가공 시 소모된 전극부분이 아닌 새로운 전극면으로 구멍의 측면을 가공하여야만 하는데, 이를 위해서는 직경이 일정한 전극을 긴 길이로 제작하여야 하는 난점이 있으며, 보이스코일의 이송 제어와 모니터링에 세심한 주의를 필요로 한다.

4. 결론

본 연구에서는 미세구멍 가공용 방전 가공기의 방전 발생 전압을 모니터링하여 이를 기반으로 보이스코일 액츄에이터로 구동되는 이송축을 제어함으로써, 전극과 가공물 사이의 단락을 방지하면서 항상 최적의 방전 조건을 유지할 수 있는 미세구멍 가공용 방전 가공기를 개발하였다. 미세구멍 가공용 전극은 황동 전극을 NaOH 수용액중에서 전해 가공하여 제작하였으며, 두께 0.1 mm 인 스테인레스 판재에 대하여 구멍가공 특성을 실험하여 본 연구에서 개발한 미세 방전 가공 시스템의 유용성을 입증하였다.

참고문헌

1. 김규만, 최덕기, 주종남, "미세축 구멍 가공을 위한 미세방전가공기의 개발," 한국정밀공학회지, 제15권, 제12호, pp. 55-61, 1998.
2. 김규만, 김보현, 주종남, "미세구멍의 미세 방전 가공에서 가공율과 전극소모 특성," 한국정밀공학회지, 제16권, 제10호, pp. 94-100, 1999.
3. 윤재웅, 양민양, "미세구멍의 방전가공에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제14권, 제5호, pp. 1147~1154, 1990.
4. B. Sprenger, "Planner high speed linear direct drive with submicron position," Paper for degree of Doctor of Technical Science, Swiss Federal Institute Technology ETH, Zurich, 1999.
5. 이준우, "보이스코일 액츄에이터를 기반으로한 고정밀 직선이송 시스템의 위치결정," 강원대학교 석사학위논문, 2000.
6. Young-bong Bang, Toshiro Higuchi, "Development of Micro Drilling Machine Using Voice Coil Motor," Journal Japan Soc. of Precision

Engineering, 1998.

7. Young-bong Bang, Toshiro Higuchi, "Drill Breakage Detection and Measurement of Distance to the Drilling Surface on the Micro Drilling Machine Using Voice Coil Motor," Journal Japan Soc. of Precision Engineering, 1999.

부록

