

가공력 제어 위치 서보 시스템을 이용한 초음파 가공기의 개발

장인배* · 이승범** · 전병희***

(2004년 2월 10일 접수)

Development of Ultrasonic Machine with Force Controlled Position Servo System

I. B. Chang, S. B. Lee and B. H. Jeon

Abstract

The machining technology for the brittle materials such as ceramics are applied to the fields of MEMS(micro electromechanical system) by the progress of new machining technologies such as Etching, Diamond machining, Micro drilling, EDM(Electro discharge machining), ECDM(Electro discharge machining), USM(Ultrasonic machining), LBM(Laser beam machining), EBM(Electron beam machining). Especially, the USM technology can be applied to the dielectric brittle materials such as silicon, borosilicate glass, silicon nitride, quartz and ceramics with high aspect ratio. The micro machining system with machining force controlled position servo is developed in this paper and the optimized ultrasonic machining algorithm is constructed by the force controlled position servo control. The load cell is adapted in the force measuring and the servo control algorithm, suit for the ultrasonic machining characteristics, is established with using the PID auto-tuning functions at the PMAC system which is generally adapted in the field of robot industries. The precision force signal amplifier is constructed with high precision operational amplifier AD524. The vacuum adsorption chuck which is made of titanium and internal flow line is engraved, is used in the workpiece fixing. The machining results by USM shows that there are some deviation between the force command and the actual machining force that the servo control algorithm should be applied in the machining procedures. Therefore, the constant force controlled position servo system is developed for the micro USM system and by the examination machining process in USM, the stable USM system is realized by tracking the average value of machining force.

Key Words : Ultrasonic Machining, MEMS, Force Feedback, Position Servo, PID, Auto Tuning

1. 서 론

반도체, 전기전자, 바이오, 광학, 기계 등의 산업전반에 저비용, 고품질이 요구되고 있으며, MEMS(Microelectromechanical systems) 기술의 발달로 기존의 절삭 방식으로는 가공하기 어려운

신소재, 세라믹류 등 난삭재의 정밀가공 기술이 요구되고 있다. 특히 광, 열, 유체 기능성 재료로 많이 사용되고 있는 유리는 고강도, 고경도, 내마모성 등 많은 장점을 갖고 있으나, 기존 금속계열의 가공법과는 다른 새로운 방법들이 요구된다. 이러한 난점을 해결하기 위해 EDM(Ele

* 강원대학교 기계.메카트로닉스공학부
** 강원대학교 대학원 기계.메카트로닉스공학부
*** 인덕대학교 컴퓨터응용 기계계열

-tro discharge machining), ECDM(Electro discharge machining), USM(Ultrasonic machining), LBM(Laser beam machining), EBM(Electron beam machining), Etching, 다이아몬드 가공법, 마이크로 드릴링 등 다양한 연구가 진행되었다.^(1~3)

초음파 가공(USM)은 수십 kHz대의 초음파 진동을 가공 툴(Horn)에 가하여 가공입자 (Abrasive)와 가공액이 혼합된 슬러리(Slurry)를 통해 가공물을 충격 파쇄하는 가공법으로, 비전도성, 취성재료에 대한 가공이 가능하며, 레이저나 방전가공과 달리 가공입자에 의한 기계적인 가공으로 재료 표면에 열변형을 가하지 않으므로 더 좋은 가공 표면을 제공한다. 또한, 가공입자에 의한 미세 크랙 발생 원리로 가공이 수행되기 때문에 전기가 통하지 않는 경취성 재료의 가공에 우수한 성능을 발휘한다.

초음파 가공에서 가공 효율성을 결정하는 주요 요소는 가공입자의 크기와 초음파 진동에 의해 입자가 가공물을 타격하는 가공력(Impact force)이다. 비접촉식 가공법인 초음파 가공은 가공물과 혼 사이의 미세한 간격(Clearance)이 존재하며, 슬러리는 초음파 진동에 의해 운동 에너지를 얻게 되고, 이 운동 에너지를 통해 가공물을 타격하여 가공이 수행된다. 그럼에도 불구하고 대다수 초음파 가공 시스템은 가공력을 피드백 하지 않고 단순히 서보 모터의 단위 이송을 통해 가공을 수행함으로써 가공 시간이 많이 소요되며 툴(혼)의 손상을 초래하였다. 또한 가공력에 의한 정압제어가 이루어지지 않아 가공입자에 의한 가공이 아닌 초음파 혼이 가공물에 닿아 기계식 초음파 드릴링 현상이 발생되어 가공면의 형상 정밀도를 낮추고 공구의 수명을 단축시켰다.⁽⁴⁾

본 논문에서는 초음파 가공을 위한 가공력 제어형 위치 서보 시스템을 이용한 초음파 가공기를 개발하였다. 시스템의 건실성을 확보하기 위하여 초음파 가공시 발생하는 가공력의 변화를 분석하여 AC 서보모터 구동을 위한 최적의 PID tuning을 수행하였다. 또한, 공작물 하단에 위치한 로드셀에서 측정된 가공력의 모니터링을 통해 가공시 발생하는 초음파 혼과 가공물 사이의 물리적인 접촉현상을 회피하기 위한 이득 조절을 수행하였다. 본 논문을 통하여 개발된 초음파 가진된 가공입자의 타격력을 고려한 정압 제어형 초음파 미세 가공기의 가공력 모니터링을 통하여

미세 초음파 가공과 가공력 사이의 상관관계를 살펴본다.

2. 이론적 배경

2.1 미세 초음파 가공

초음파 가공법은 가공입자 1 회의 충격력에 의한 파쇄량이 미소하기 때문에 고정밀도를 얻을 수 있으며 표면 거칠기도 좋고, 비 화학적(non-chemical), 비 열적(non-thermal) 가공이며, 물리/화학적인 안정성을 갖기 때문에 가공물에 큰 변형을 주지도 않는다. 가공 매커니즘은 크게 Hammering, impacting, cavitation으로 나뉜다. 이러한 특성으로 인해 전도체나 비전도체 가공이 가능하다. 따라서 유리, 카바이드, 그래파이트 등의 세라믹 계열의 모든 취성 재료에 효과적인 가공 방법이다.

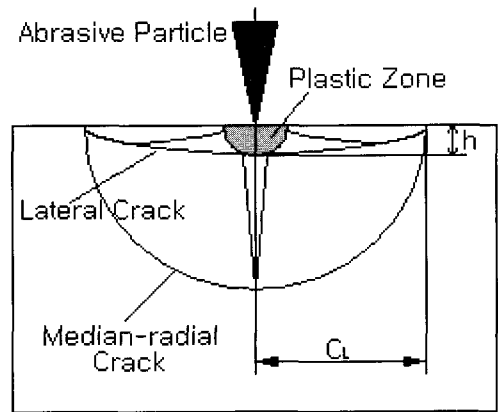


Fig. 1 Material removal by impacted particle

Fig. 1은 Al_2O_3/SiC_w Whisker 강화 세라믹의 가공면에 충돌하는 입자에 의한 타격현상을 나타낸다. 세라믹과 같은 취성재료의 가공 방정식은 다음과 같다.

$$V = \sum N\pi C_L^2 h \quad (1)$$

여기서 V 는 volume loss, C_L 은 lateral crack length, h 는 mean depth이다. C_L 과 h 는 다음 식에 의해 주어진다.

$$C_L \propto [(E/H_V)^{3/4} K_{IC}^{-1} H_V^{-1/4}]^{-1/2} P^{5/8} \quad (2)$$

$$h \propto (E/H_V)^{1/2} (P/H_V)^{-1/2} \quad (3)$$

여기서 E 는 Young's modulus, H_V 는 visker hardness, K 는 상수이며 P 는 가공중 입자로부터 가공물에 작용하는 vertical impact force이다. 식 (2)와 (3)을 이용해 식 (1)을 정리하면

$$V = K \sum N \pi E^{5/4} K_{IC}^{-1} H_V^{-1/2} P^{7/4} \quad (4)$$

식 (4)에서 체적손실은 K_{IC}^{-1} 에 의존한다. 또한 크랙의 경로는 크랙 진행에 대한 저항이 작은 쪽으로 진행된다. 그러므로 USM시 이상적인 조건하에서 가장 높은 MRR은 파쇄 인성이 가장 작은값에 따라 결정된다. 초음파 가공의 이상적인 조건은

$$\frac{V(\theta=0^\circ)}{V(\theta=90^\circ)} = \frac{K_{IC}^b}{K_{IC}^a} \quad (5)$$

이다. 식 (5) 좌변 $V(\theta=0^\circ)$ 와 $V(\theta=90^\circ)$ 의 비율은 같다. 이 결과에 대해 Lee, Jianxin⁽⁵⁾에 의해 실험적으로 증명되었다.

2.2 정압구동기

초음파 가공법은 공구와 가공물간에 가공 입자의 평균 입경에 해당하는 가공 클리어런스(공구와 가공물 사이의 간격)가 생기게 된다. 초음파 가공은 가공물뿐만 아니라 공구의 마모, 가공입자의 순환에 의한 공구 측면부의 가공량도 발생하기 때문에 정확한 가공 형상을 얻기 위해서는 가공하고자 하는 구멍 크기에 따른 적절한 가공입자의 크기와 공구 직경의 선정, 가공중에 발생한 공구의 마모 등을 고려한 최적의 가공 공정의 선정이 요구된다.

특히, 초음파 가공법은 공구 형상이 가공물에 그대로 전사되는 가공법이기 때문에 공구에 의해 가공면에 작용하는 가공압은 항상 일정하도록 유지해야 한다. 또한 초음파 가공의 특성상 가공에 사용되는 다이아몬드, 알루미늄, 세리아 등의 미세 가공입자들(Abrasive)은 고강도의 입자들로 가공물의 가공과 함께 공구의 마모도 불가피하게 발생된다. 이러한 공구의 마모는 가공입자의 종류와 크기, 가공력에 따라 영향⁽⁶⁻⁷⁾을 받게 되므로

초음파 가공시 적절한 가공입자의 선정과 함께 가공력 피드백 제어가 중요하다.

대다수 초음파 가공 시스템은 가공력 신호를 피드백 하지 않고 모터의 단위 이송에 의한 가공을 수행하거나, 피드백을 하더라도 제어기(Controll-er)의 데이터 처리속도 한계로 인해 수십 kHz대의 초음파 진동에 대한 응답 속도가 느려 가공력 정압 제어 시스템의 한계가 있었다.

만약, 정압 구동형 운동 제어 시스템을 사용하지 않을 경우에는 초음파 가공에 의해 가공된 칩이 원활하게 제거 되지 못하거나, 가공과 함께 가공입자의 파쇄가 진행되어 가공효율이 저하된다. 또한, 기타 다른 이유로 인해 가공이 전혀 이루어지지 않는 경우에 단순히 공구의 이송을 후퇴 및 전진한다고 기본적인 시스템의 결함을 해결할 수는 없고, 에스펙 비율에 제한이 있으며, 가공면의 형상오차를 야기하게 된다.

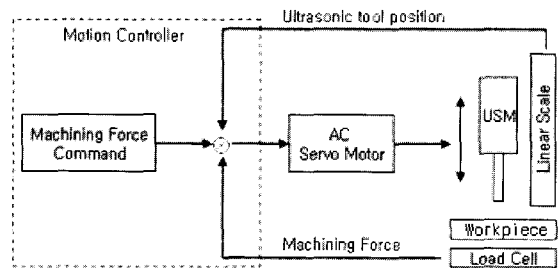


Fig. 2 Ultrasonic machining force control system

따라서 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 시스템을 구축하여 로드셀을 이용해 실시간으로 가공력 계측을 수행하였으며, 다축 모션 제어기 PMAC (Programmable multi axis controller)을 사용하여 계측된 가공력을 통해 AC 서보 모터의 위치 제어⁽⁸⁻⁹⁾를 수행하여, 가공력 제어형 위치 피드백 서보 시스템을 구축 하였다.

3. 가공력 제어형 초음파 가공기 시스템 구축

가공력 제어형 초음파 가공 시스템은 크게 3부분으로 구성된다. 첫째, 가공이 이루어 지는 초음파 가공기 및 가공물 고정 부분. 두 번째, 정압 제어 및 서보 모터 위치제어를 위한 제어기 (PMAC), 주축 이송을 위한 AC 서보 모터와 위치 피드백용 리니어스케일. 세번째, 로드셀을 이용한 가공력 계측 및 신호 증폭과 A/D 변환 기이다.

3.1 초음파 가공기

초음파 가공기는 압전 세라믹 가진 소자가 28kHz의 주파수를 발생시키며, 이를 전달하여 최종적으로 가공입자를 가진하는 혼은 원추형(Conical type)으로 Booster와 볼트 체결된다. 혼은 티타늄(titanium) 합금을 사용하였다. Fig. 3은 초음파 발생장치(Ultrasonic generator)와 혼이 결합된 초음파 공구를 보여주고 있다.

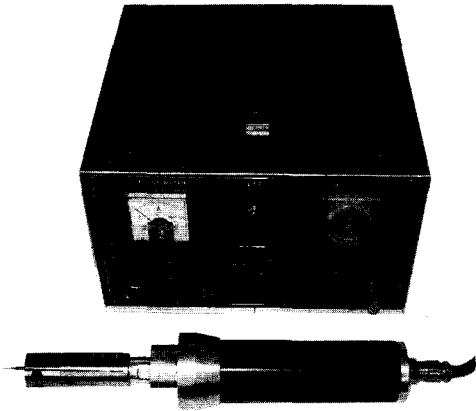


Fig. 3 Ultrasonic pulse generator and horn

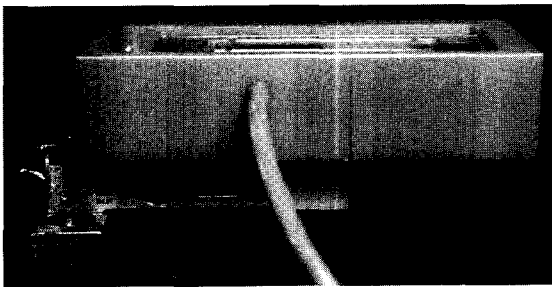


Fig. 4 Vacuum workpiece holder

가공물(Workpiece)은 초음파 가진에 의해 진동이 발생하며, 가공물의 진동은 가공력의 변화를 발생시킨다. 따라서 가공물의 흔들림 현상을 방지하기 위해 가공물을 진공 흡착/고정하는 방식을 채택 하였다. 진공펌프의 최대 진공도는 580mmHg이다. 기존의 가공물 고정 방식을 개선하여 가공물이 초음파 가진에 의해 흔들림 없는 안정된 위치를 유지하도록 하였다.

3.2 PMAC 다축 운동 제어기

본 연구에서 사용된 운동 제어기는 Deltatau사의 PMAC(Programmable Multi Axis Controller)-Lite^(10,11)로서, 모듈라의 DSP56K를 사용하여 최대 8축까지 동시제어가 가능한 고성능 다축제어 컨트롤러이다. PMAC은 로봇, 공작기계, 레이저 가공기, 실리콘 웨이퍼 가공기등 Sub-micron 제어로부터 수백 kW급의 대용량 운동제어에 이르기까지 다양한 적용 분야에 걸쳐 사용되고 있는 제어기이다.

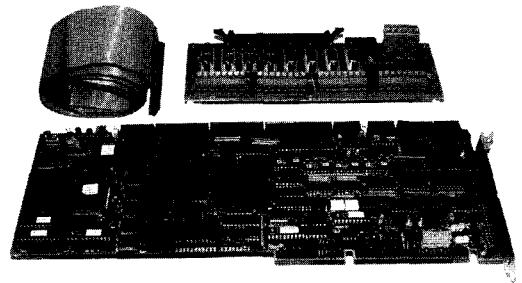


Fig. 5 PMAC-Lite motion controller board

PMAC에서 사용가능한 축은 X,Y,Z, U,V,W, A,B,C가 있다. 이들 중 X,Y,Z은 기본 선형축이며, U,V,W는 제2의 선형축, A,B,C는 회전축이다. 모터들을 한 개의 좌표계에 설정 하여 동일한 운동제어 프로그램을 사용하거나 한 개의 공구 이송을 위해 모터들이 조합하여 제적을 결정할 때 사용, 또는 서로 다른 좌표계에 모터들을 분리하여 설정 함으로서 다른 모션 프로그램으로 제어하거나, 서로 독립적인 작업을 수행 할 때, 각 모터들이 서로 다른 공구나 기계를 제어할 때 사용된다. 한 개의 축을 가지는 8개의 좌표계로부터 8개의 축을 가지는 1개의 좌표계까지 모든 조합이 가능하다.

Fig. 6은 PMAC의 위치제어 방식을 표현한 것으로 Ix02는 DAC 출력 어드레스, Ix03은 위치 루프 피드백 어드레스, Ix04는 속도 루프 피드백 어드레스 변수이다. 만약, 부하의 센서를 엔코더나 리니어 스케일 하나의 신호만을 사용하여 피드백 할 경우에는 Ix03, Ix04는 동일한 값을 갖지만, 두 개의 신호를 피드백 받을 경우(Dual feedback) 모터의 엔코더는 속도 피드백을 위해 Ix04에 할당하며, 리니어스케일은 위치 피드백을 위해 Ix03 변수를 사용한다. 이러한 이중 피드백은 엔코더만을 사용

한 기계적 오차와 리니어 스케일 만을 사용했을 경우의 엔코더 보다 낮은 안정성을 개선한다. 본문에서는 모터에 부착된 엔코더를 사용하지 않고 부하쪽에 설치한 리니어 스케일을 사용하여 위치 피드백 신호로 사용하였다.

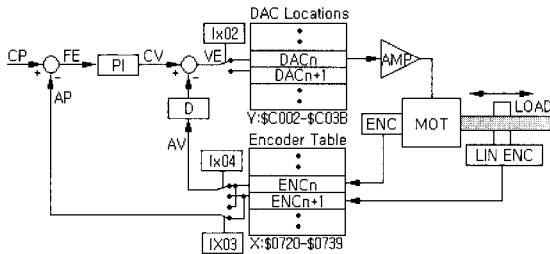


Fig. 6 PMAC pulse and direction output

초음파 혼이 장착된 수직축의 운동제어를 위하여 PMAC에 내장된 PID 제어 알고리즘을 사용하였으며, 가감속 도중에 공구와 가공물에 가해지는 충격력을 최소화하기 위하여 blended linear move의 S-곡선운동을 사용하여 수직축의 위치제어를 수행하였다.

서보모터는 대우 DS-F01CA-1 모델을 사용하였고 모터의 정격출력은 100 Watt, 정격 회전 속도는 3000 rpm, 최대 회전속도는 4500rpm 이다. 서보 드라이버는 DASD-C-01SPCA 모델로 단상(AC200~220V)를 사용하며, 정현파 PWM 제어 방식으로 토크제어, 위치제어, 속도제어가 모두 가능하다. 토크제어 사양은 DC 0~± 9V, 위치 제어 사양은 최대 주파수 400kPPS로 +5V 레벨의 펄스를 사용하며, 속도제어는 DC ± 2~± 10V 지령값을 사용한다.

초음파 가공을 위해 처음에는 엔코더를 사용하여 모션 제어를 수행하였으나, 커플링에서 발생하는 슬립과 볼스크류에서 발생하는 기계적 오차를 최소화 하기 위하여 Fig. 7의 리니어 스케일(Linear scale)을 사용하여 주축 이송계를 구성하였다. 리니어스케일은 Mitutoyo AT111을 사용하며, 측정범위는 100~1500mm, 최대 응답 속도는 72m/min이다. 리니어 스케일의 위치 정보를 제어기에 입력하기 위해서는 별도의 펄스 발생장치가 필요하므로 Mitutoyo 펄스 신호 유닛인 PSU-102를 사용하여 구형파(Square wave pulse)를 생성하여 PMAC 보드에 입력하였다. PSU 102는 1μ m 와 0.5μ m 분해능의 두가지 모드가 있으며, 실험에서는 0.5μ m

스케일을 사용하였다. 따라서 주축의 모터 이송시 분해능은 0.5μ m/pulse 의 이송단위를 갖는다.

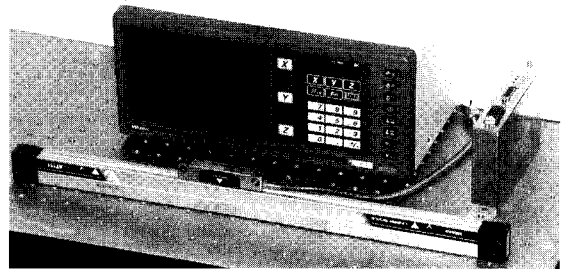


Fig. 7 Linear scale and pulse signal unit

3.3 가공력 계측 및 신호처리

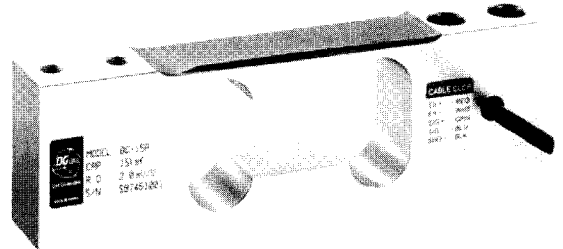


Fig. 8 Load cell for force monitoring

가공력의 계측을 위하여 스트레인 게이지형 로드셀을 사용하였다. 로드셀의 탄성체 변화에 의해 출력된 신호는 mV 단위의 매우 작은 전압값이다. 실험에 사용된 로드셀은 CAS BCL-2L(single point)으로 정격출력은 1.1± 0.1 mV/V 이다.

로드셀 신호를 가공력 데이터로 사용하기 위해서는 신호 증폭을 수행해야 한다. 그러므로 Fig. 9에서 보는 바와 같이 고정밀 측정 시스템에 사용되는 Analog Device사의 AD524를 이용하여 증폭회로를 구성하였다

증폭율(Gain)은 10배, 100배, 1000배의 3가지 연결이 가능한 전용 핀이 있으나, 초음파 진동을 통해 가공입자에 의한 로드셀 출력값을 모니터링하며 증폭율을 조정 할 수 있도록 3번핀과 16번핀에 가변저항을 설치하였다.

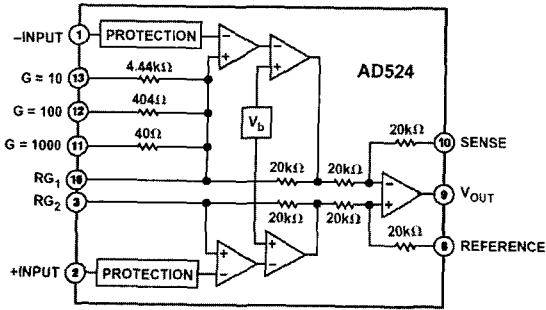


Fig. 9 Functional block diagram of AD524

또한 옴셋량을 조절하기 위하여 AD524 전원 입력단에 두 개의 가변저항을 사용하였으며, 출력단의 옴셋량을 조절하기 위해 6번핀에 741 연산증폭기를 사용하였다. 가공력의 선형성을 높이기 위해 증폭율을 조정하여 실험한 결과 출력 신호는 최대 1000배 까지 안정된 특성을 나타내었다.

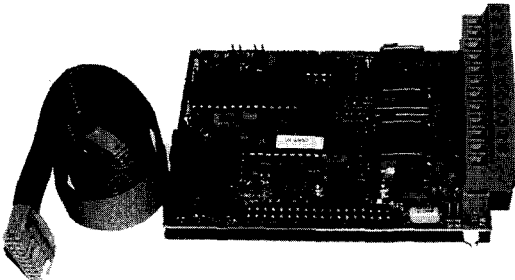


Fig. 10 A/D converter board(ACC-28A)

로드셀의 증폭된 신호를 컴퓨터에서 데이터로 처리하기 위해 PMAC에서 제공하는 A/D 변환보드인 ACC-28A를 사용하여 A/D 변환을 수행 하였다. ACC-28A는 4채널, 16-bit 분해능의 A/D 변환기이다.

AD524를 통해 증폭된 로드셀 신호는 positive 또는 negative양 또는 음의 단일출력이므로 ACC-28A는 single-ended로 설정하였으며, -10V~+10V 범위를 갖는다. 만약 차동입력일 경우 사용 범위는 -5V~+5V 이다. 이번 실험에서는 Singled-ended 입력이므로 나머지 한 개의 입력단은 AGND에 연결하여 노이즈를 개선 하였다.

Fig. 11에는 본 논문을 통하여 구축된 가공력 제어형 초음파 가공기 시스템으로, 초음파 혼, 모터,

리니어스케일, 로드셀과 공작물 홀더, PMAC 제어부와 서보 구동부, 로드셀 계측부 등이 조립된 모습을 보여주고 있다.

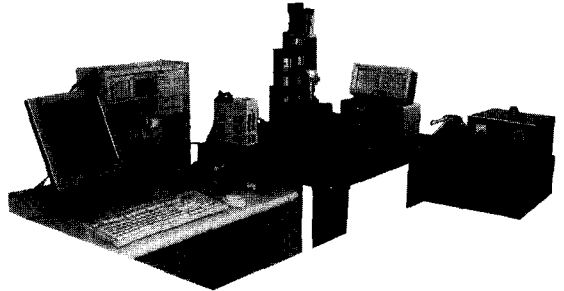


Fig. 11 Force controlled USM system

4. 작동성능의 검증

4.1 로드셀 교정과 서보기구 이득조절

본 논문에서 제작된 가공력 계측 시스템의 계측 신뢰성을 검증하기 위하여 1/1000g 정밀 전자저울을 사용하여 로드셀 교정을 수행하였다. PMAC ACC-28A A/D 보드를 사용하여 단위 하중에 의한 로드셀 출력 아날로그 값을 디지털로 변환하였으며, PMAC에서 데이터 처리를 수행 하였다. Fig. 12는 부하에 대한 A/D 변환값을 나타낸다. 로드셀의 최대 허용하중은 2Kg_f로 선형성이 보장되며, 측정 결과 100g까지 선형적임을 알 수 있다. 또한 선형 피팅결과 0.5% 이내에서 선형성이 확보됨을 검증할 수 있었다.

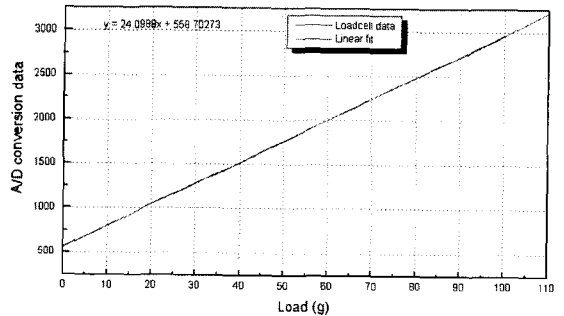


Fig. 12 Load cell calibration

위치 제어기의 기준 제어이득을 구하기 위하여 PMAC에 내장된 자동(auto) 튜닝 기능을 사용하여 PID 튜닝을 수행⁽¹²⁾하였다. 먼저 초음파 혼에 공구

를 부착하기 전의 무부하 상태에서 튜닝을 실시한 이후, 수작업으로 이득 조절을 수행 하였다. PMAC 내장함수에 의한 이득 튜닝 결과는 오버슈트를 수반하여 공구와 공작물 사이의 접촉이 발생하여 공구의 파손을 초래한다. 따라서, 자동적으로 설정된 이득값에 의한 스텝 응답 그래프를 보면서 수작업으로 PID이득을 가감하여 오버슈트가 발생하지 않는 이득을 구하여야만 한다. Fig. 13에는 오버슈트가 발생하지 않는 계의 스텝 응답 곡선이 도시되어 있다.

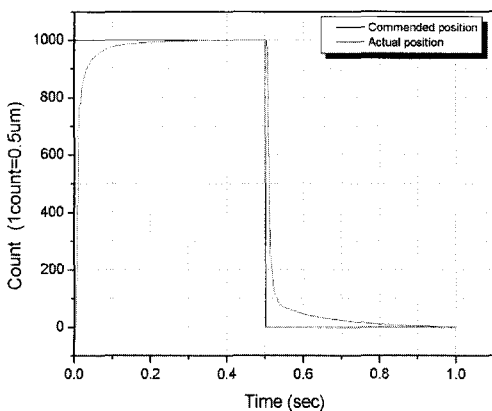


Fig. 13 Step response of the force feedback system

4.2 가공특성 실험을 통한 이송속도 교정

미세 초음파 가공에서 정밀한 가공면을 얻으면서도 최대의 가공속도를 유지하기 위해서는 혼과 가공물 사이의 정확한 위치 제어가 수행 되어야 한다. 특히, 공구의 이송 속도는 가공 효율성과 공구 마모율을 결정하는 매우 중요한 인자이다.

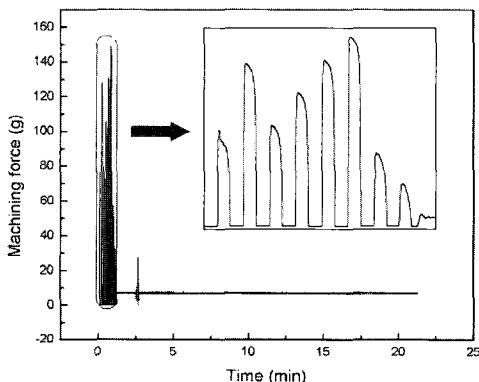


Fig. 14 Variation of machining force (preload 7g, feed speed 4 μ m/sec)

Fig. 14는 직경 300 μ m 혼과 가공력 7g, GC 입자 20 μ m, 이송속도 8count/sec (4 μ m/sec)로 실험한 것으로 공구가 최초 가공물과 접촉하면서 피크 하중이 발생하고 이를 만회하기 위하여 공구가 후진 및 전진을 반복하면서 초기 수 분간 피크로드가 발생하고 있음을 알 수 있다. 특히, 0.819분 영역에서 최대 149.11478g의 가공력이 발생하였다. 원인은 혼이 가공물에 접촉하면서 발생한 것으로 혼의 가공 위치를 찾기위한 일종의 데이터 수집 방법이며 이송속도가 크기 때문에 주축이 가공물에 닿아 오차가 증폭되었기 때문이다. 따라서 모터의 가감속 및 이송속도가 적절히 설정되지 않으면 과도한 하중이 작용하여 틀에 손상을 입힐 수 있다. 또한 너무 작은 가공력을 사용하면 혼과 가공물간의 클리어런스가 커서 유리 가공에 많은 시간이 소요되므로 가공시간과 가공표면에 대한 적절한 Trade-off가 이루어져야 한다. 2분 30초 후 발생한 두 번째 피크는 혼이 안정된 위치를 유지한 후 가공수행 중 순간적인 가공력의 증가를 나타내는데, 이러한 현상은 슬러리에 포함된 가공입자가 다량으로 가공물에 영향을 주었거나 가공입자가 혼과 가공물 사이에 끼는 현상으로 혼, 가공입자, 가공물이 일시에 결합된 것과 같이 되어 초음파 진동이 가공물에 직접 가해졌기 때문이며, 기계적 초음파 드릴링 현상이 발생되었음을 알 수 있다.

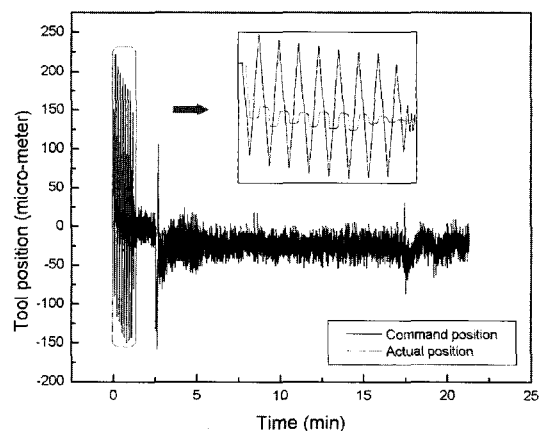


Fig. 15 Command and actual tool position (preload 7g, feed speed 4 μ m/sec)

Fig. 15는 Fig. 14 실험에서의 가공력 변화에 대한 주축(혼)의 위치 변화를 나타내고 있다. 초기

단계에서 발생한 제어기의 과도한 위치 지령값의 변화는 가공력이 크게 변하였기 때문이다. 제어기의 위치 지령값에 대해 실제 위치는 지령값의 평균치에 근접하여 이송되며 큰 가공력이 발생된 이후 주축의 위치가 안정되고 있다. 또한 가공개시 2분 30초 후 발생한 과도한 위치 지령값은 앞에서 설명한 바와 같이 가공력이 순간적으로 급변하였기 때문이다. 따라서, 가공력 변화와 주축(혼)의 위치는 상호 연관되어 있으므로, 적절한 가공력과 주축 이송속도를 결정하여 과도한 진동없는 안정된 시스템을 구축하는 것이 툴의 손상을 예방하고 가공효율을 높이는 방법이다.

Fig. 16은 예하중과 이송비를 낮춰 초기에 급변하는 가공력을 개선한 결과이다. 이때, 주축의 이송비는 5count/sec(2.5 μ m/sec)이며, 예하중은 5g이다. 이 경우, 초기 혼 진입시 최대 가공력은 11.970g으로 Fig. 14의 결과에 비해 크게 개선되었음을 알 수 있다.

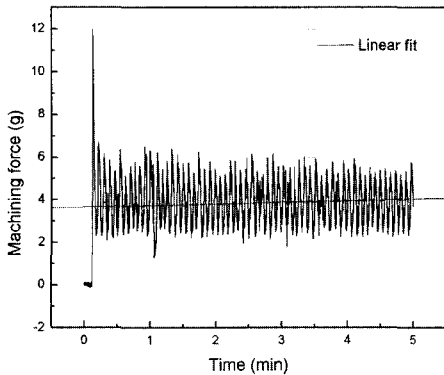


Fig. 16 Variation of machining force (preload 5g, feed speed 2.5 μ m/sec)

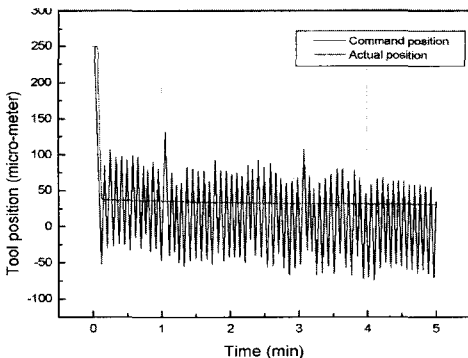


Fig. 17 Command and actual tool position (preload 5g, feed speed 2.5 μ m/sec)



Fig. 18 Machined result with force feedback USM(tool= ϕ 100 μ)

가공력의 변화시 위치 지령값에 대한 실제 이송결과를 살펴보면 지령값은 가공력 변화에 대응하여 빠른 응답 특성을 보이지만, 모터의 이송속도를 낮게 설정하였으므로 실제 위치와 지령치와는 많은 차이점을 보인다.

Fig. 18에서는 가공력 피드백 알고리즘을 사용하여 직경 100 μ m 공구로 유리 시편에 초음파 가공을 시행한 결과를 보여주고 있다. 본 사례에서는 공구의 초기 진입 시점에서의 가공력 피크 발생으로 가공 경계면이 거칠게 가공 되었으나 차츰 가공력이 안정화되면서 가공면의 거칠기가 개선되어지고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 가공력 제어형 위치 서보 시스템을 장착한 미세 초음파 가공기 시스템을 개발하였다.
- (2) 초음파 혼의 이송시 오버슈트의 발생을 방지하기 위하여 자동 튜닝기법을 사용하여 PID 이득을 구한 후 수작업으로 이득 조절을 수행하였다.
- (3) 로드셀과 하이브리드 증폭기 및 A/D 보드의 측정특성 교정을 통하여 선형율 0.5% 이내에서 가공력 측정기의 교정을 수행 하였다.
- (4) 가공실험을 통하여 안정적으로 가공력을 제어할 수 있는 예하중과 이송 속도값을 도출하였다.
- (5) 본 연구 결과를 토대로 하여 향후, 공구의 초기 진입 시점에서 예하중과 이송비율을 최소화

하여 부드럽게 최초 접촉조건을 형성한 후, 차츰 이송비율과 예하중을 늘려 나간다면 가공 정밀도의 향상과 가공속도의 증대를 동시에 추구할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발사업 중 한국 기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광 열유체 마이크로부품 기술개발사업의 세부과제로 수행중이며 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) Xi-Qing Sun, T. Masuzawa, M. Fujino, 1996, "Micro ultrasonic machining and its applications in MEMS", *Sensors and Actuators A:Physical*, Vol.57, No.2, Nov. 1996, pp. 159~164.
- (2) B. Ghahramani, Z. Y. Wang, 2001, "Precision ultrasonic machining process:A case study of stress analysis of ceramic(Al_2O_3)" *J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 8, pp. 1189~1208.
- (3) 신용주, 김현영, 장인배, 김병희, 전병희, 2002, "초음파에 의한 고 세장비 유리가공 특성", *한국소성가공학회지* 제11권 제7호, pp. 608~613.
- (4) K. Egashira, K. Mizutani, 2002, "Ultrasonic vibrati-on drilling of microholes in glass", *Annals of the CIRP*, Vol. 51, No. 1.
- (5) Tai-Chiu Lee, Deng Jianxin, 2001, "Ultrasonic erosion of whisker-reinforced ceramic composites", *Ceramics International*, Vol. 27, No.7, pp. 755~760.
- (6) Q. H. Zhang, J. H. Zhang, Z. X. Jia, J. L. Sun, 1999, "Material-removal-rate analysis in the ultrasonic machining of engineering ceramics", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, No.1-3, pp. 180~184.
- (7) Herik Dam, Per Quist, Mads Peter Schreber, 1995, "Productivity, surface quality and tolerances in ultrasonic machining of ceramics", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 51, No.1-4, pp. 358~368.
- (8) 원재윤, 2000, "운동제어기를 이용한 이송계서보 제어의 특성에 관한 연구", *공학석사학위논문*, 강원대학교.
- (9) 김종식, 1994, "선형 제어시스템 공학", 청문각.
- (10) Deltatau, 1998, "PMAC User's Manual".
- (11) Deltatau, 1998, "PMAC/PMAC Software Reference".
- (12) J. G. Ziegler, N. B. Nichols, 1942, "Optimum setting for autoamtic controllers", *Trans. ASME.*, Vol. 64, pp. 759~768.