

초정밀 자유곡면 가공용 long stroke fast tool servo 의 설계 및 특성 평가

Design and Testing of a Long Stroke Fast Tool Servo for Ultra-precision Free-form Machining

✉ 김호상¹, 이광일¹

✉ Ho-Sang Kim¹ and Kwang-Il Lee¹

¹ 고등기술연구원 로봇/생산기술센터 (Center for robot and manufacturing tech., Institute for Adv. Eng.)

✉ Corresponding author: hoskim@iae.re.kr, Tel: 031-330-7332

Manuscript received: 2008.10.24 / Revised: 2008.11.25 / Accepted: 2008.11.26

Long stroke Fast Tool Servo (LFTS) with maximum stroke of 432 μm is designed, manufactured and tested for fabrication of optical free-form surfaces. The large amount of stroke in LFTS has been realized by utilizing the hinge and lever mechanisms which enable the displacement amplification ratio of 4.3. In this mechanism the peculiar shape was devised for maximizing the displacement of end tip in LFTS and special mechanical spring has been mounted to provide the sufficient preload to the piezoelectric actuator. Also, its longitudinal motion of tool tip can be measured by capacitive type displacement sensor and closed-loop controlled to overcome the nonlinear hysteresis. In order to verify the static and dynamic characteristics of designed LFTS, several features including step response, frequency response and cut-off frequency in closed-loop mode were experimentally examined. Also, basic machining result shows that the proposed LFTS is capable of generating the optical free-form surface as an additional axis in diamond turning machine

Key Words: Long Stroke Fast Tool Servo (장대형 고속 공구대), Ultra-precision Free-form Machining (초정밀 자유곡면 가공), Closed-loop Control (폐루프 제어), Piezoelectric Actuator (압전액츄에이터), Capacitive Type Displacement Sensor (정전용량센서), Displacement Amplification Mechanism (변위확대구조)

1. 서론

최근 들어 마이크로 전자소자 및 미세 광학부품 가공에 대한 수요가 급증하면서 수십 mm 급의 크기를 가지며 서브 마이크로 미터 대의 형상정밀도를 가지는 초정밀가공품의 수요가 크게 늘어나고 있다. 대표적인 예로 미세 레이저 가공용 f θ 렌즈, 마이크로 렌즈 어레이, 다초점 안경 등과 같은 분야에서 비회전 대칭 형상의 수요가 급증하고 있다.¹ 이러한 형상의 광학부품 가공에는 대체로

그라인더나 폴리싱 등을 통한 자유곡면 가공방법이 주로 사용되어져 왔으나 초정밀가공기의 보급과 관련기술의 발전에 따라 공구의 형상을 그대로 시편에 전사할 수 있고 가공시간을 획기적으로 줄일 수 있는 다이아몬드 선삭에 의한 가공법이 주목을 받고 있다. 특히, 선반형태의 초정밀가공기에서 부가축 개념의 고속 공구대(fast tool servo; FTS)를 사용하여 비회전 대칭 형태의 형상가공을 수행하는 방법이 선진각국의 연구기관과 유력한 가공기업체에서 최근 급격히 연구되고 있다.²

초정밀가공기에서 자유곡면 가공은 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 workpiece 회전축과 동기화된 공구의 이송에 의하여 이루어지며, 이를 구현하기 위한 방안으로써 공구의 고속/고정밀 이송을 담당하는 FTS 가 Z 축 위에 장착되고 있다. 일반적으로 고속/고정밀 이송의 구현을 위하여 고강성/반복성의 장점을 가지는 압전액츄에이터(piezoelectric actuator)가 구동기로서 채택되고 있으나, 압전액츄에이터 자체의 제한된 이송 영역과 비선형성에 의하여 자유곡면 가공에서 문제점을 나타낸다.^{3,6} 이를 해결하기 위해 기존의 FTS 의 스트로크의 제약을 개선하고 실제 렌즈나 미러를 가공하기 위한 준비로서 장대형 고속 공구대가 제안된 바 있다.⁷

본 연구에서는 압전액츄에이터의 제한된 이송 영역은 탄성 힌지 기반의 변위 확대 기구의 적용을 통하여 극복하고, 히스테리시스(hysteresis)로 대표되는 비선형성은 피드백제어를 통해 감소시켜 초정밀 자유곡면 가공을 위한 압전액츄에이터 기반의 장대형 고속공구대(long stroke fast tool servo; LFTS)를 설계 및 개발하였다. 제작된 LFTS 의 기구적, 제어적 특성을 확인하기 위해 관련 사양의 실험적 검증을 수행하고 기초적인 자유곡면 형태의 가공시험을 통해 초정밀가공기의 부가축으로서의 특성을 확인하였다.

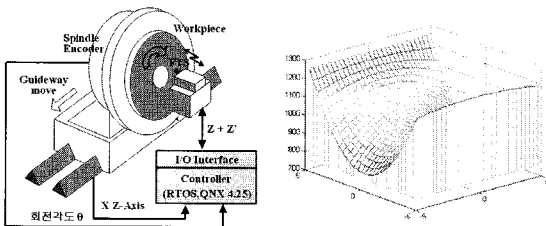


Fig. 1 Strategy for free-form surface machining in ultra-precision diamond turning machine

2. LFTS 의 모델링 및 설계

2.1 힌지와 레버를 이용한 변위확대구조

LFTS 의 구동을 위한 압전액츄에이터의 경우 상용화된 제품을 기준으로 최대 180 μ m 의 이송범위(Physik instrumente, P239.90)를 나타내고 있으며 자유곡면 가공용 LFTS 의 이송범위 400 μ m 를 구현하기 위해서는 탄성 힌지 기반의 변위 확대 기구를 적용하여야 한다. 이러한 메커니즘을 구현하기 위해 LFTS 에는 Fig. 2 에 나타난 사각형 탄성 힌지

를 사용하였으며, 공구의 선형운동을 결정하기 위하여 Fig. 3 의 평행 스프링 구조(parallel spring mechanism)를 추가적으로 배치하였다. 이러한 경우 사각형 탄성 힌지와 병렬형 탄성 힌지의 평행 스프링 구조의 강성은 아래와 같이 계산할 수 있다. 사각형 탄성 힌지의 최소두께 t 가 힌지의 폭 h 와 원형 노치의 반경 R 에 비해 충분히 작다고 가정하고 힌지에 작용하는 굽힘 모멘트를 M_b , 이로부터 발생하는 회전량을 θ 로 정의하는 경우 사각형 탄성힌지의 굽힘 강성(flexural rigidity) 은 Paros 와 Weisbord 가 빔 이론으로부터 유도한 굽힘 강성식에 의하여 다음 식 (1)과 같이 간단히 표현된다.⁸ 여기서 E 는 사각형 탄성 힌지의 탄성계수(elasticity modulus)를 나타낸다.

$$k_b = \frac{M_b}{\theta} = \frac{2Eht^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \text{ [N m/rad]} \quad (1)$$

탄성 힌지를 사용하여 선형 운동을 구현하기 위해서는 Fig. 3 의 평행 스프링 구조가 사용된다. 상하에 위치하는 탄성힌지 사이의 거리를 l 로 정의하고 외부에서 작용하는 힘 F 에 의하여 각각의 탄성 힌지에서 발생하는 모멘트 M_b 는 다음 식 (2)와 같이 결정된다.

$$M_b = k_b \theta = \frac{1}{4} Fl \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (2)$$

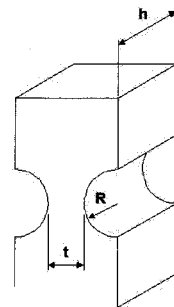


Fig. 2 Quadrangle elastic hinge for LFTS

이러한 경우 발생하는 변위 x 가 미소하면 회전량 θ 는 다음 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\theta = \frac{x}{l} \text{ [rad]} \quad (3)$$

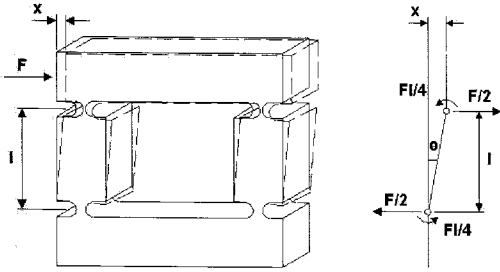


Fig. 3 Parallel spring mechanism

따라서 평행 스프링 구조의 강성 k_h 는 식 (2), (3)을 사용하는 경우 다음과 같이 주어진다.

$$k_h = \frac{4k_b}{l^2} \text{ [N/m]} \quad (4)$$

힘 F 와 수직인 방향으로 변위를 최소화하기 위하여 평행 스프링 구조를 이중으로 사용하는 경우 안내요소의 축방향 강성 K_h 는 식 (1), (4)를 사용하여 다음과 같이 계산된다.

$$K_h = 2k_h = \frac{M_b}{\theta} = \frac{16Eht^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \text{ [N/m]} \quad (5)$$

기계적 레버와 평행 스프링 구조를 사용한 변위확대구조를 Fig. 4에 나타내었다. 변위확대구조는 압전액추에이터에서 발생한 기본변위를 기계적 레버를 통하여 확대시키고 2개의 평행 스프링 구조에 의하여 최종 공구의 선형운동을 발생하게 된다. 기계적 레버의 힌지 1, 피벗 2, 힌지 3의 굽힘 강성을 각각 K_1 , K_2 , K_3 라 하고 평행힌지의 강성을 K_m 으로 정의하는 경우 레버의 등가강성 K_{eq} 는 식 (6)과 같이 주어진다.⁹ 여기서 a 는 레버의 입력 길이를 나타낸다.

$$K_{eq} = \frac{K_1 + K_2 + K_3}{a^2} \quad (6)$$

레버에서 발생하는 선형변형이 미소하다고 가정하는 경우 기계적 레버와 평행 힌지로 구성된 구조물의 강성 K_a 는 식 (7)과 같이 정의된다. 여기서 r 은 레버의 확대계수를 나타낸다.

$$K_a = K_{eq} + r^2 K_m \quad (7)$$

최종적으로 변위 확대 기구와 압전액추에이터가 조립된 경우 LFTS의 공구에 발생하는 변위 Δv 는 식 (8)과 같이 주어진다. 여기서 L , k_p 는 각각 압전액추에이터의 공칭 최대 변위와 강성을 나타낸다.

$$\Delta v = \frac{L \times k_p \times r}{K_a + k_p} \quad (8)$$

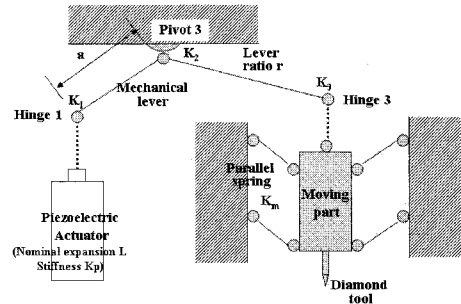


Fig. 4 Displacement amplification mechanism of LFTS

사각형 탄성힌지와 평행 스프링 구조를 사용하여 최종적으로 설계된 LFTS의 구조는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5와 같이 스프링 구조의 대칭 배열에 의한 구조적 안정성을 극대화하고자 하였으며 압전액추에이터, 정전용량형센서 그리고 공구의 일직선상의 배열에 의한 아베 오차 최소화를 실현하였다. 또한 이송범위 100 μ m의 압전액추에이터를 적용하기 위하여 탄성 힌지 사이의 거리를 1:5로 결정하였으며 레버의 회전중심, 힘 작용점, 변위 발생점을 일직선상에 정렬함으로써 원주방향 변위의 최대화를 구현하였다. 또한, 스프링을 사용하여 압전액추에이터에 효과적인 예압(pre-load)을 인가할 수 있는 구조를 제안하였으며 end-effect의 동특성 향상을 위한 이송부의 경량화를 구현하고자 하였다.

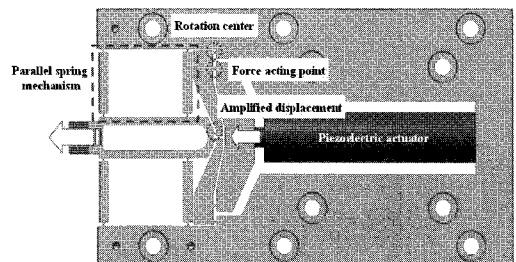


Fig. 5 Designed LFTS for free-form surface machining

2.2 LFTS 의 제작 및 개선

Precitech 社의 Variform 은 2 개의 압전액추에이터를 사용하여 변위 확대 구조를 형성하고 있으나 최종 확대된 변위의 이송축을 기준으로 하는 경우 비대칭성을 이루고 있으며 이는 실제 가공에서 구현하고자 하는 이송 이외의 자유도를 가질 수 있는 단점을 나타낸다.^{10,11}

따라서 Fig. 5 에 나타낸 평행 스프링 구조의 대칭 배열에 의하여 실제 가공시의 구조적 안정화를 극대화하고자 하였다. 또한 압전액추에이터와 정전용량 센서 그리고 공구를 일직선상에 배열함으로써 회전 오차인 아베 오차를 최소화하고자 하였으며 이를 통하여 실제 위치 결정을 위한 제어기의 부하를 최소화하고자 하였다. 탄성 힌지 사이의 거리를 1:5 로 결정한 것은 변위 확대과정에서 발생하는 레버의 회전에 의한 기구적 변위 손실과 구조물에 의하여 야기되는 반력에 의한 압전액추에이터의 변위 손실 그리고 탄성 힌지에서 발생하는 변형을 고려하여 최종적으로 설계목표인 이송 범위 400 μ m 를 확보하기 위함이다. 또한 Fig. 6 에 나타낸 바와 같이 레버의 회전이 발생하는 반경 방향 변위를 최소화하기 위하여 회전중심, 힘 작용점 그리고 변위 발생점을 일직선상에 정렬하여 반경 방향 변위의 최소화 및 원주방향 변위의 최대화를 구현하고자 하였다. 압전액추에이터에 예압을 인가하는 구조는 Fig. 7 에 도시하였다. Fig. 7 과 같이 스프링 가이드의 왼쪽 끝은 Main body 에 고정되어 있는 Cap 에 연결하고 오른쪽 끝은 압전액추에이터의 끝단에 직접 연결시키는 구조를 사용하였다. 특히, 이러한 구조를 구현하기 위해 스프링 가이드는 평행힌지와 레버에 미리 파져 있는 홈을 통과하며 두 부품 사이의 간섭이 없도록 제작을 하여 스프링의 압축력이 압전구동기에 직접 인가되도록 제작하였다.

LFTS 와 같이 압전액추에이터의 기본변위를 증폭하는 경우 변위 확대 기구와 압전액추에이터의 직렬연결에 의하여 전체 강성은 압전액추에이터 자체의 강성과 비교함에 있어 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 이러한 특성은 실제 가공에의 적용에 있어 외란에 민감한 현상을 나타낼 수 있으며 결과적으로 가공 면에 미세한 진동을 나타내는 chatter가 발생하고 초정밀 가공에서의 최종 가공물 품질을 급격히 저하시키는 문제를 초래한다. 따라서 실제 이송부의 질량을 최소화함으로써 LFTS 의 공진주파수를 높이고자 하였으며 Fig. 8 과

같이 불필요한 재료의 제거 및 공구부의 경량화를 진행하였다.

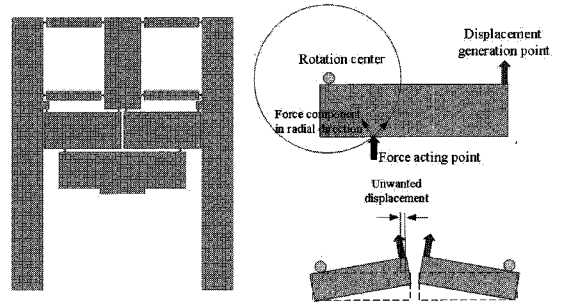


Fig. 6 The effect of rotation at lever mechanism

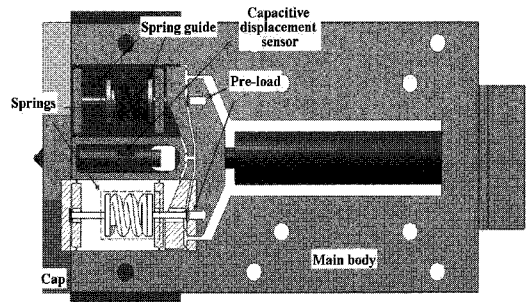


Fig. 7 Two-springs for pre-load of LFTS

2.3 LFTS 의 유한요소 해석

설계된 LFTS 의 경우 변위를 확대하기 위하여 물리적으로 매우 연한(flexible) 탄성 힌지를 사용하고 있으며 실제 구동의 경우 압전액추에이터에 의한 변위 발생에 대한 구조물의 부위별 항복여부를 검토하여야 한다. 항복 여부를 확인하기 위하여 Fig. 9 에 나타낸 바와 같이 유한요소법을 사용한 응력해석을 수행하였다. 구조물의 재질은 SM45C 로 결정하였고 압전액추에이터의 등가적인 탄성계수(Equivalent Young's modulus)를 고려하여 재질을 적용하였다.¹²

입력조건으로는 압전액추에이터와 구조물 사이의 접촉부분에 변위조건을 입력하는 방법을 사용하였다. 압전액추에이터에 의한 변위 발생의 경우 가장 높은 응력이 발생할 것으로 고려되는 7 개의 부위를 선정하였으며, 각각의 부위에 대하여 압전액추에이터가 변위를 발생하는 경우 최대응력을 해석적으로 계산하였다.

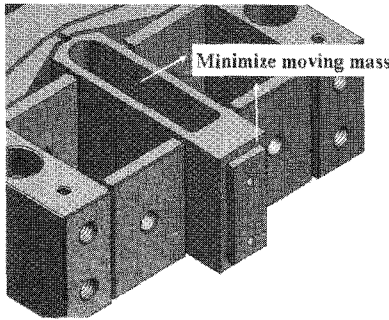


Fig. 8 Strategy to maximize the resonance frequency of LFTS

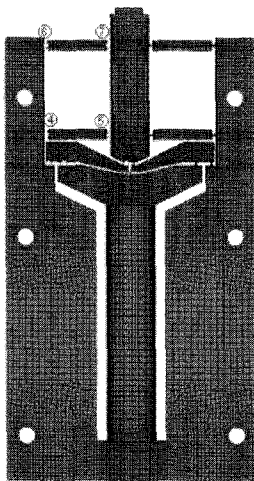


Fig. 9 Meshes for stress analysis of LFTS

Table 1 The von Mises stresses at several points of LFTS

Input displacement at the edge of PZT (μm)	10	50	87.6	100
Stress (MPa)				
①	35.6	178.0	312.0	356.1
②	35.3	176.3	309.0	352.7
③	28.5	142.7	250.0	285.4
④	29.8	149.1	261.2	298.2
⑤	27.0	134.9	236.3	269.8
⑥	27.8	138.8	244.0	277.5
⑦	27.9	139.6	244.6	279.2

압전액츄에이터에서 발생한 변위에 따른 응력을 Table 1 에 나타내었으며 확대된 최종 변위 약 $430\mu\text{m}$ 일 때 압전액츄에이터의 변위는 약 $87.6\mu\text{m}$ 으로 계산된다. 이때 최대응력은 힌지 부분에서

약 312MPa 로 계산되며 사용한 재질의 항복응력인 340MPa 이하에 있으나 안전계수를 고려하여 향후 재질을 타이타늄 재질로 변경하여 항복응력에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 참고로 탄성 힌지에 발생하는 응력의 분포는 Fig. 10 에 나타내었다.

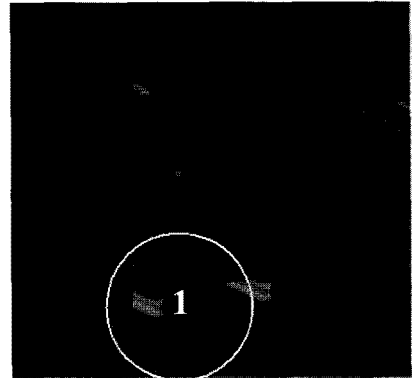
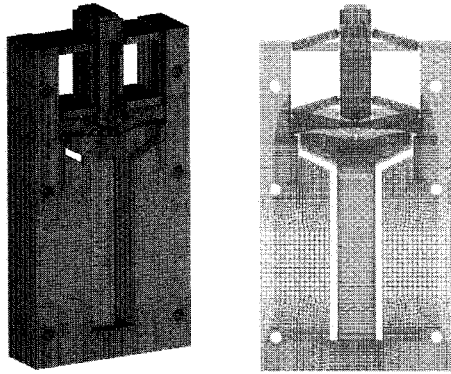


Fig. 10 Stress distribution at point 1

LFTS 의 동특성을 파악하기 위하여 유한요소법을 사용한 고유진동수 해석을 진행하였다. 이러한 경우 LFTS 의 3 차원 메쉬는 Fig. 11(a)에 나타내었으며 압전액츄에이터와 구조물의 재질은 앞서 실시한 응력해석과 동일하게 설정하였다. 해석결과로써 1 차 고유진동수는 360Hz 를 나타내며 2 차 고유진동수는 1.89kHz , 3 차 고유진동수는 2.12kHz 를 나타내었다. 1 차 모드는 Fig. 11(b)와 같이 압전액츄에이터의 팽창과 수축시 평행 힌지를 통하여 공구 끝단이 상하방향으로 이동하는 형태이고 2 차와 3 차 모드는 압전액츄에이터가 전후, 좌우 방향으로 움직이는 형태를 나타낸다. 일반적으로 실제 구동시 발생하는 압전액츄에이터의 운동방향은 상하방향이며 이는 1 차 모드로써 1 차 고유진동수를 최대한 높게 나타내어야만 위치 결정을 위한 제어기 구현 시 대역폭을 증가시킬 수 있음을 나타낸다.

유한요소해석 결과를 정리하는 경우 최대 이송 범위는 $432\mu\text{m}$ 이며 1 차 공진주파수는 360Hz 를 나타내고 있다. 이는 본 연구에서 목표로 한 이송 범위 $400\mu\text{m}$ 를 충족시키는 수치이며, 공진주파수 역시 자유곡면 가공형상의 가공에 필요한 수십 Hz 의 구동주파수를 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 제안 및 설계된 LFTS 를 직접 제작하였으며 조립도는 Fig. 12 에 나타내었으며 실제 제작된

LFTS 는 Fig. 13 에 나타난 바와 같다. 또한 LFTS 를 구성하는 각 부품들은 Table 2 에 정리하였다.



(a) 3-dimensional meshes (b) 1st mode shape
Fig. 11 FEM meshes of LFTS

액츄에이터에 0~1000V 의 전압을 인가하였으며 Fig. 15 와 같이 레이저 인터페로미터(HP5529A)를 사용하였다. 측정된 이송범위는 432 μ m 이며, LFTS 의 DC-gain 은 0.432 μ m/V 로 계산된다.

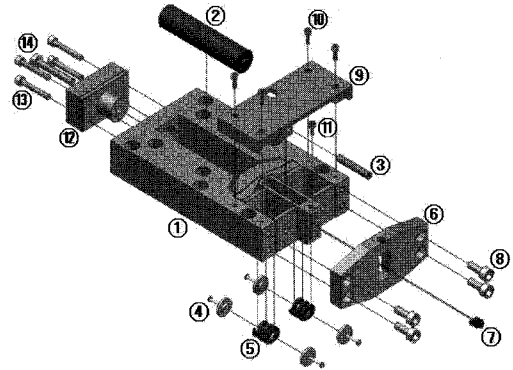


Fig. 12 Assembly drawing for LFTS

Table 2 The mechanical components of LFTS

Number	Component	Quantity
①	LFTS body	1
②	Piezoelectric actuator	1
③	Capacitive sensor	1
④	Spring supporter	4
⑤	Spring	2
⑥	Spring holder	1
⑦	Diamond tool	1
⑧	M8 bolt	4
⑨	Sensor holder	1
⑩	M4 bolt	4
⑪	M4 bolt	1
⑫	Actuator supporter	1
⑬	M6 bolt	4
⑭	M8 bolt	1

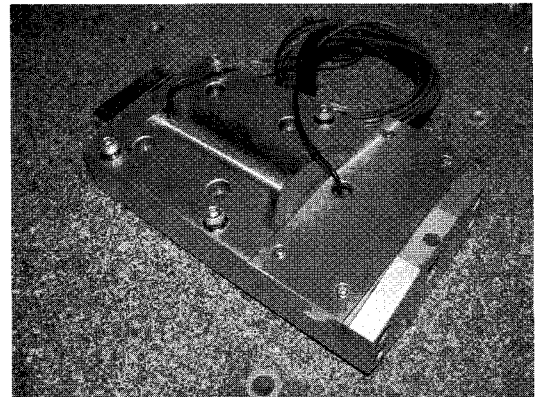


Fig. 13 Photograph of manufactured LFTS

3. LFTS 의 실험적 검증

3.1 정강성 측정

제작된 LFTS 의 정강성을 측정하기 위하여 Fig. 14 과 같이 가동 부에 임의의 중량을 인가하여 발생하는 가동부의 변위를 측정하였다. 측정된 LFTS 의 정강성은 1.732N/ μ m 이다. 참고로 Precitech 사의 Variform 의 경우 1.2 N/ μ m 로 알려져 있다.¹⁰

3.2 최대 이송범위

LFTS 의 최대 이송범위를 측정하기 위해 압전

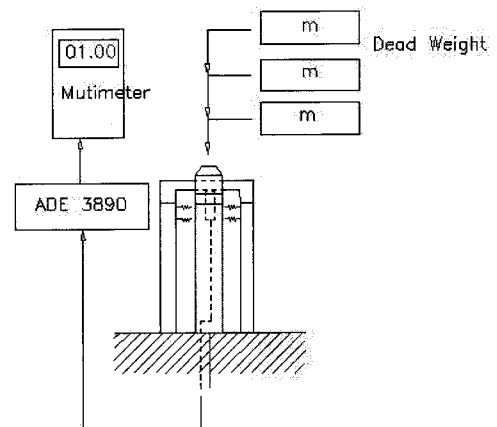


Fig. 14 Experimental setup for static stiffness of LFTS

3.3.1 차 공진주파수 측정

LFTS의 정현파 응답은 Fig. 16에 나타난 바와 같이 함수발생기(Tektronix CFG 280)를 사용하여 입력전압의 주파수를 20Hz 부터 700Hz 까지 증가시키며 가진 하였으며, 이러한 경우 최종 주파수 응답특성은 Fig. 17에 나타난 바와 같이 360Hz의 1차 공진주파수를 나타내었다.

3.4 단위 응답특성

LFTS의 위치 결정 관련 특성을 파악하기 위하여 Fig. 18에 나타난 바와 같이 실험 장치를 구성하였으며 여기서 실험 장치는 real-time OS인 QNX를 사용하여 50 μ sec의 정주기 샘플링(fixed-rate sampling)을 구현함으로써 압전액추에이터의 안정성을 확보하여 실험시 접근이 용이하고 다양한 특성을 파악할 수 있도록 하였다. 또한 오실로스코프를 사용하여 실제 제어시 발생하는 외란의 특성 파악 및 전체 실험 거동을 확인하고자 하였다.

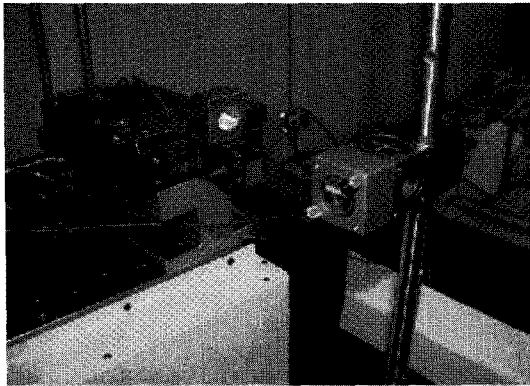


Fig. 15 Optical setup for measuring maximum displacement of LFTS

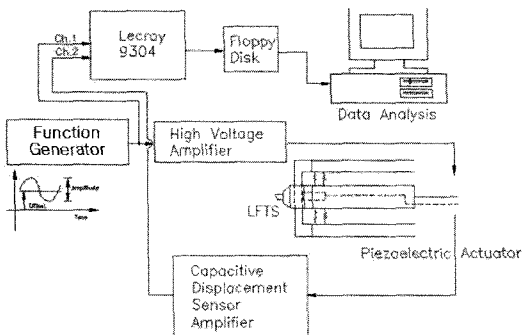


Fig. 16 Experiment setup for resonance frequency of LFTS

LFTS의 과도 진동특성을 확인하기 위하여 Fig. 18의 실험 장치와 같이 압전액추에이터에 입력전압 1, 2, 5, 10V를 인가하고 이에 따른 정전용량 센서의 출력을 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 19에 나타난 바와 같으며 진동파형에 대한 약 37.9msec의 settling-time과 감쇠고유진동수에 대한 감쇠비는 0.01로 결정되었다.

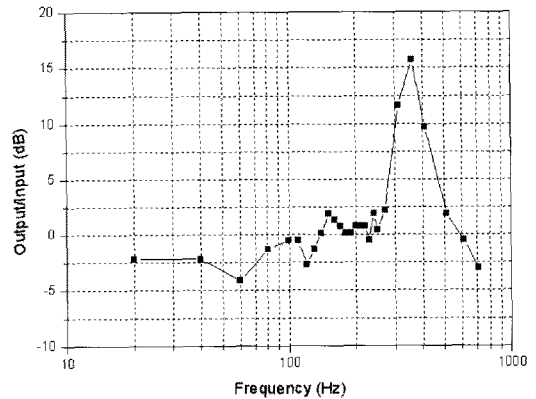


Fig. 17 Bode-plot of LFTS (magnitude)

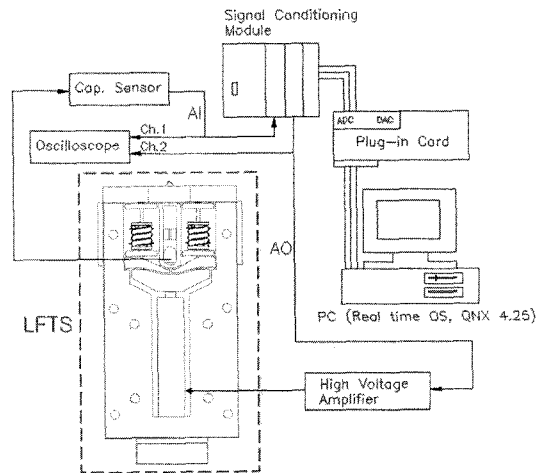


Fig. 18 Experimental setup for PI-control to test LFTS characteristics

3.5 히스테리시스 거동

압전액추에이터는 자체의 이력현상으로 인하여 입력전압의 크기, 주파수 그리고 현재 변위 및 이력에 따라 비선형 이력현상을 나타낸다. LFTS의 이력현상을 정성적으로 파악하기 위해 LFTS에 입력 전압을 0~900V에서의 삼각파를 인가하며 이에

따른 변위를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 20 에 나타내었다.

3.6 동적 정밀도 측정

PI 제어를 사용한 전체 블록 다이어그램은 Fig. 21 에 나타내었다. Fig. 21 의 페루프 제어 알고리즘을 사용하여 LFTS 의 히스테리시스를 감소시켜 동적 정밀도를 측정하였다. 여기서 동적정밀도는 페루프 제어를 통해 명령치와 실제 추종치 사이의 오차를 3 dB 이하로 제한하는 입력파형의 주파수를 나타낸다. LFTS 의 페루프 제어실험을 위해 입력 명령값에 비하여 출력 변위의 비율을 주파수를 증가시키며 측정을 하였다. 입력 명령값은 50, 100, 150, 200 μ m 의 진폭을 가지는 정현파이며 PI 제어기 기반의 LFTS 제어시 출력변위는 Fig. 22 에 나타내었다. 이러한 측정 결과에서는 진폭이 가장 낮은 50 μ m 의 정현파에 대해서 약 80Hz, 진폭이

가장 높은 200 μ m 의 경우 약 70 Hz 에서 3 dB 의 대역폭을 나타내며, LFTS 에 인가되는 명령값의 진폭이 증가하는 경우 추종할 수 있는 최대주파수가 감소하는 비선형 현상을 확인하였다. 이러한 동적 정밀도를 측정함으로써 초정밀 자유곡면 가공기에 부가 축으로서 장착하기 위한 기초 데이터를 획득할 수 있다.

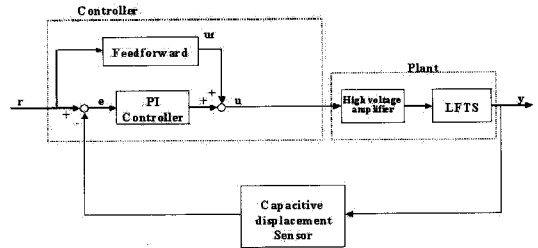


Fig. 21 Block-diagram of PI-controller

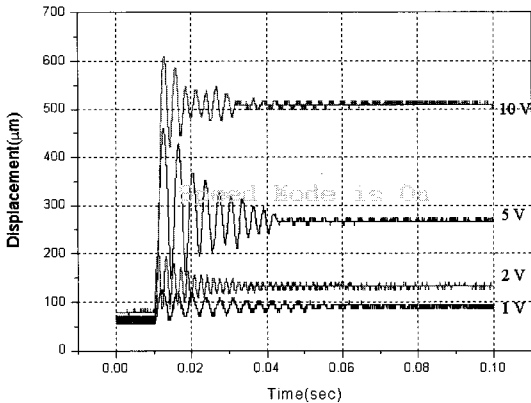


Fig. 19 Step response of LFTS

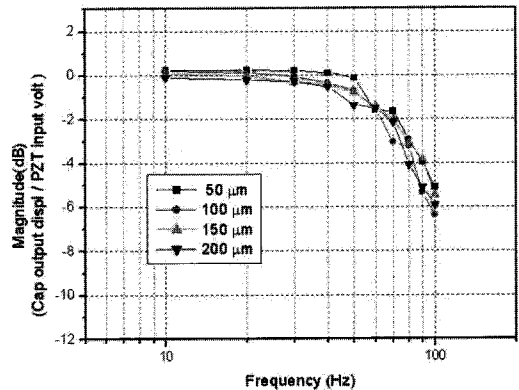


Fig. 22 Closed loop bandwidth of LFTS with various amplitudes

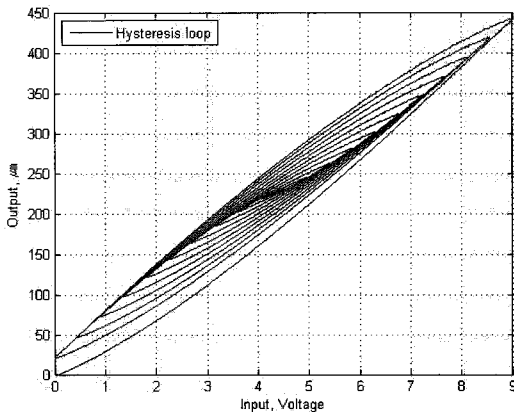


Fig. 20 Hysteresis of LFTS

3.7 기초 가공시험

LFTS 의 가공기 제어축으로서 절입이 인가되는 것을 확인하기 위해 Fig. 23 과 같이 최대 깊이 50 μ m 이고 한 주기 당 2 번의 산과 마루를 갖는 토크 형상을 가공하였다. 가공조건은 회전속도를 600rpm 으로 고정하였으며 플라스틱 재질의 직경 50mm 의 가공시편을 사용하였다. 가공면은 비회전 대칭면 중에서 주주사 반경과 부주사 반경의 부호가 반대인 토크 형상이다. 이러한 형상은 선반 가공 시 스핀들의 회전 에 따라 회전각도에 동기된 LFTS 의 가변 절입을 필요로 한다. 이를 위해 다이아몬드 터닝 머신의 CNC 부분과 LFTS 제어기 사이에 PCI 버스를 통한 데이터 전송을 수행하였

다. LFTS는 제어기인 PC에서 피드백 제어 알고리즘을 수행하고 필요한 스피들 회전각도의 값은 PCI 슬롯에 꽂힌 PMAC 보드의 Dual port RAM을 통해 고속 전송을 받게 된다. 실제 구현된 LFTS와 다이아몬드 터닝 머신의 가공사진은 Fig. 24와 같다.

Fig. 25는 가공시편의 반경방향 프로파일을 회전각도별로 미국 RTH社의 Talysurf에 의해 측정된 값들을 보여준다. 토릭 면의 경우 주주사 반경과 부주사 반경의 부호가 다르므로 Fig. 25와 같이 각도별로 프로파일의 기울기의 부호가 다르게 나타난다. 또한 Fig. 26은 가공시편의 회전방향 프로파일을 반경 별로 미국 RTH社의 Talysurf에 의해 측정된 결과로서 회전방향으로 2 주기의 정현파 무늬가 나타나며 진폭의 크기는 반경 15, 20, 24mm일 때 각각 15.36 μ m, 28.46 μ m, 42.36 μ m로 측정되었다.

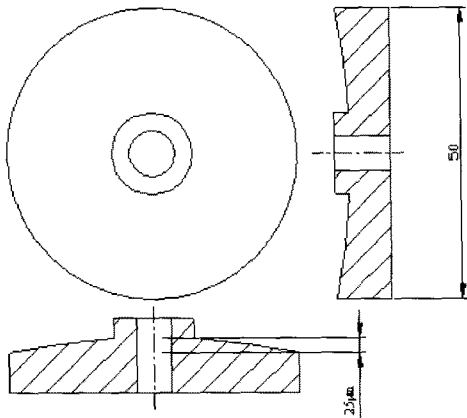


Fig. 23 Dimensions of workpiece

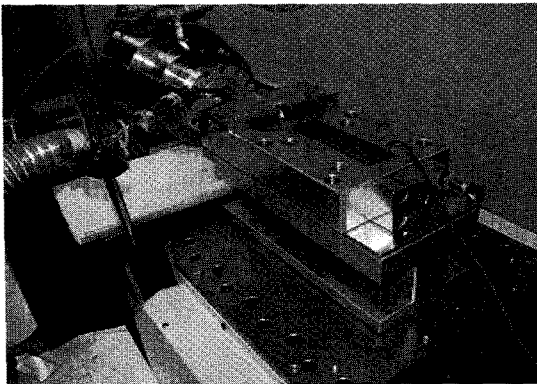


Fig. 24 Photograph of free-form machining with LFTS

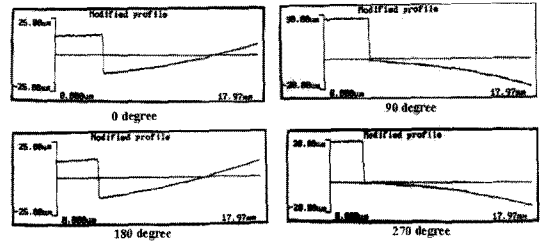


Fig. 25 Machined surface profiles ($\theta = 0, 90, 180, 270$ deg)

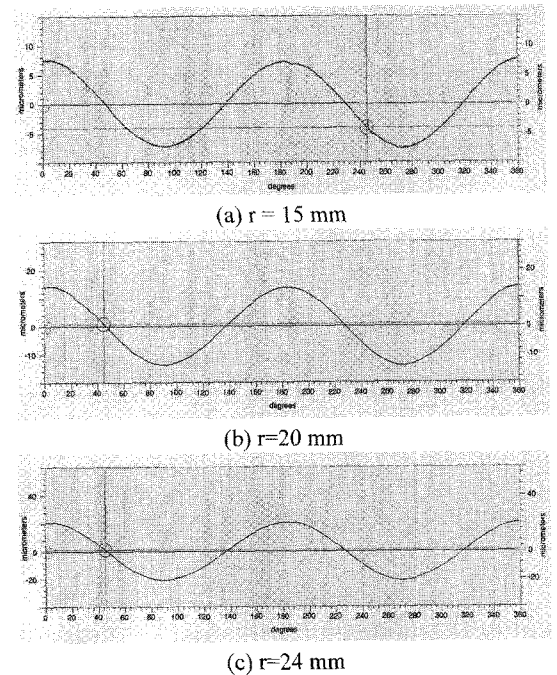


Fig. 26 Machined surface profiles ($r=15, 20, 24$ mm)

4. 결론

본 연구에서는 스피들 회전방향으로 빠른 공구의 운동이 필요한 자유곡면형태의 광학형상 가공을 위하여 장대형 고속공구대(Long stroke fast tool servo)를 개발하였다. 충분한 공구끝단의 변위확보를 위해 대칭형태의 레버와 탄성 힌지로 이루어진 변위확대구조를 제안하였으며 LFTS의 고유진동수 향상을 위한 경량화 구조를 제안하였다. 또한 제작 전에 세부적인 설계사양의 예측을 위해 유한요소 해석을 실시하여 부분별 응력해석 및 공진주파수를 계산하였다. 관련특성을 시험한 결과 최대이송범위 432 μ m, 주파수특성으로서 1차 고유진동수 360Hz, 동적 정밀도 70Hz의 결과를 얻었으며 기

초적인 가공시험을 통해 초정밀 자유곡면 가공에 적용할 수 있는 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 추후 제안된 고속 공구대의 성능개선을 위해 구조적인 고유진동수의 향상을 통한 페루프 제어 성능의 향상과 압전액츄에이터의 히스테리시스 정밀 제어를 통한 추종성능 향상에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Brecher, C., Lange, S., Merz, M., Niehaus, F., Wenzel, C. and Winterschladen, M., "NURBS based ultra-precision free-form machining," *Annals of CIRP*, Vol. 55, No. 1, pp. 547-550, 2006.
2. Garrard, K., Bruegge, T., Hoffman, J., Dow, T. and Sohn, A., "Design tools for freeform optics," *Proceedings of the SPIE*, Vol. 5874, pp. 95-105, 2005.
3. Patterson, S. R. and Magrab, E. B., "Design and testing of a fast tool servo for diamond turning," *Precision Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 123-128, 1985.
4. Dow, T. A., Miller, M. H. and Falter, P. J., "Application of a fast tool servo for diamond turning of non-rotationally symmetric surfaces," *Precision Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 243-250, 1991.
5. Kim, H. S., Kim, E. J. and Song, B. S., "Diamond Turning of Large Off-axis Aspheric Mirrors using Fast Tool Servos with On-Machine Measurement," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, Issue 3, pp. 349-355, 2004.
6. Kim, H. S. and Kim, E. J., "Feed-forward control of fast tool servo for real-time correction of spindle error in diamond turning of flat surfaces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, Issue 12, pp. 1177-1183, 2003.
7. Kim, H. S., Kim, S. I., Lee, K. I., Lee, K. M. and Bang, Y. B., "Development of long stroke fast tool servo for diamond turning machine with its range of 432 μ m," *Proc. of KSPE Spring conference*, pp. 497-498, 2008.
8. Paros, J. M. and Weisbord, L., "How to Design Flexure Hinges," *Machine Design*, No. T-27, pp. 151-156, 1965.
9. Musa, J. and Renyi, Y., "Modeling of flexure-hinge type lever mechanisms," *Precision Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 407-418, 2003.
10. Kinetic Ceramics Inc., *Products Catalogue*, pp. 16-19, 2008.
11. O'Neill, C. G., "Piezoelectric positioner," *US Patent*, No. 6040653, 2000.
12. Musa, J. and Renyi, Y., "Modeling of flexure-hinge type lever mechanisms," *Precision Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 407-418, 2003.