

초정밀가공기용 타원 진동절삭 공구대의 설계 및 성능실험

이대희*, 김호상, 김의중(고등기술연구원), 오창진(충북대학교)

Design and Test of Elliptical Vibration Assisted Cutting Tool Post for Ultra-precision Machines

D. H. Lee, H. S. Kim, E. J. Kim(IAE), C. J. Oh(CBNU)

ABSTRACT

This paper presents the design and test of elliptical vibration assisted cutting tool post. It is actuated by two piezoelectric actuators which are connected to the moving part through the elastic hinge with its role of imposing the preliminary pressures. These two actuators are located at right angles so that the resulting tool tip moves like a two-dimensional ellipse. Also, the tool post is activated within the region of linear actuation in order to overcome the distorted elliptical motion. For the precise measurement of the displacement of the tool tip, three-dimensional experimental apparatus was designed and the strokes of the tool post in major and minor axes were measured. The results show that the tool post can produce the variety of vibration locus from a circle with a radius of 5 μm to an ellipse with a major axis, $a = 10 \mu\text{m}$, and a minor axis, $b = 2.5 \mu\text{m}$

Key Words : Elliptical vibration assisted cutting tool post (타원 진동절삭 공구대), Elastic hinge (탄성힌지), Piezoelectric actuator (압전액츄에이터), Ultra-precision machine (초정밀가공기)

1. 서론

절삭가공에서 다이아몬드는 가장 단단하고 열전도율이 높으며 날카로운 날을 얻을 수 있어 비철금속과 비금속재료의 절삭에 있어서 고정밀, 고효율의 절삭공구로 인식되어 왔다. 그러나 내열온도가 700℃ 정도로 낮아 철계통의 재료에 대한 절삭가공에서는 공구의 마모가 상당히 심각하여 사용상에 많은 제한을 받고 있다. 따라서 철계통의 금속가공에서는 다이아몬드 다음으로 높은 경도를 가지면서 열에 대한 화학적 안전성이 뛰어난 cBN 소결체 공구가 고정도의 각종 금속재료에 대한 가공에 적합한 것으로 알려져 왔다. 그러나 아직까지 연삭가공에 의존할 수밖에 없는 경질 난삭재의 경우 가공정밀도와 표면조도를 초정밀급으로 향상시키기 위해서는 적용상에 한계를 나타내고 있다.

이러한 이유로 1970 년도 중반에 다이아몬드 단결정공구의 고정도 절삭가공특성을 난삭재 등의 절삭에 적용하기 위해서 새로운 형태의 절삭가공방식인 진동절삭 가공법이 제안되었으며, 현재 더 작은

절삭력으로 공구수명을 연장할 수 있는 2 차원 진동절삭 가공법에 대한 연구가 활발히 진행되어 산업적인 적용가능성을 확인할 수 있는 연구성과가 도출되고 있다[1~2]. 2 차원 진동절삭 가공법은 절삭공구에 2 차원 진동을 가하면서 공작물을 가공함으로써 절삭력의 감소를 유도하여 공구마모를 최소화할 수 있으며, 또한 공작물의 가공정도를 높일 수 있는 새로운 형태의 가공법이다.

본 연구에서는 제시된 2 차원 진동절삭 가공방식의 특성을 알아보기 위해서 절삭공구에 다양한 형태의 진동궤적을 발생시킬 수 있는 새로운 형태의 진동절삭 공구대를 설계, 제작하였다. 강성계산을 통한 탄성힌지 설계로 각각의 이송방향에 대해서 최대 10 μm 이상의 진폭과 500 Hz 이상의 구동주파수를 인가할 수 있도록 설계하였으며, 설계된 진동절삭 공구대의 성능실험을 위해서 3 차원 변위측정장치를 고안하여 진동절삭 공구대의 다양한 진동궤적을 측정하였다.

2. 본론

2.1.2 2차원 진동절삭의 가공원리

2 차원 평면상에서 공구대가 위상차를 갖는 정현파 $x(t)$ 와 $y(t)$ 에 의해서 가진될 때, 공구대는 Fig. 1 과 같이 타원형상의 궤도를 그리며 운동하게 된다. 이때 각축방향의 운동은 식 (1)과(2)처럼 정현파 운동을 나타내게 된다.

$$x(t) = a \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

$$y(t) = b \cos(2\pi ft - \phi) \quad (2)$$

여기서 a , b 는 정현파의 진폭, f 는 주파수, ϕ 는 위상차를 나타낸다. Fig. 1 은 공구대의 작동원리를 나타낸다. Fig. 1 의 점 1 에서 공구와 피삭재간에 접촉이 시작되며 다음으로 공구가 점 2 와 3 사이의 구간을 지나는 동안 일반 절삭가공 방식과 달리 절삭칩과 공구사이에 역(逆) 마찰력이 작용하는 현상이 발생한다. 이러한 현상은 절삭칩의 배출을 촉진시키며, 가공면의 전단각을 크게 하여 절삭저항을 감소시키는 작용을 한다. 점 3 에서 재가공이 들어가는 점 1 까지 공구는 절삭칩으로부터 분리되어 공기와 접촉하므로 자연스럽게 가공 중에 발생하는 마찰열을 감소시킬 수 있다. 이러한 절삭과정을 통해 타원 진동절삭 가공법은 절삭저항과 절삭력의 감소를 기대할 수 있으며 다이아몬드 전삭가공시 공구 마모를 개선할 수 있는 가공법으로 기대되고 있다.

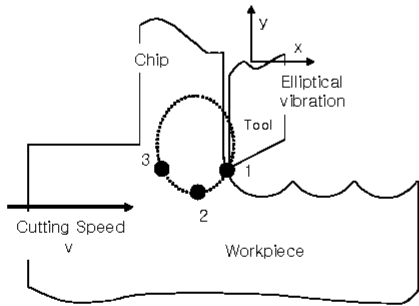


Fig. 1 Principle of two-dimensional elliptical vibration machining

2.2 설계된 진동절삭 공구대의 메커니즘

2 차원 진동절삭 가공에 있어서 가장 중요한 점은 절삭력의 감소로 인한 공구수명의 연장을 위해서 절삭공구가 공구의 절입방향과 절삭속도방향으로 이루어지는 2 차원 평면에서 원 및 타원의 진동 궤적을 원활하게 발생하도록 하는 것이며, 이를 위해서는 서로 직교하는 방향에 대해 절삭공구의 이

송을 평행하게 유도할 수 있는 공구대의 설계가 필수적이다. 본 연구에서는 절삭공구의 2 차원 진동을 위해서 Fig. 2 와 같은 타원형 진동절삭 공구대를 설계, 제작하였다. 제작된 공구대의 기본구조는 공구대를 가진하기 위한 2 개의 압전액츄에이터와 공구대의 앞단에 레버구조를 갖는 탄성힌지로 구성되어 있다. 스트로크가 작은 압전액츄에이터로 탄성힌지로 지지되는 아암을 밀게 되면 탄성힌지를 중심으로 회전운동이 발생되고 이것에 의해서 구조물 끝단에 위치한 공구는 접선방향으로 직선운동을 하게 된다. 제안된 공구대는 이러한 구동원리를 이용하여 2 차원 진동이 가능하도록 설계되었다. 힌지축이 서로 직교하는 두개의 탄성힌지와 이를 구동하기 위한 압전액츄에이터를 상하로 배치하여 서로 독립적으로 움직이게 함으로써 액츄에이터에 의한 공구대의 이송을 개별적으로 제어할 수 있도록 하였으며, 이송축에 대한 강성 및 절삭공구의 이송량을 증가시킬 수 있도록 설계되었다.

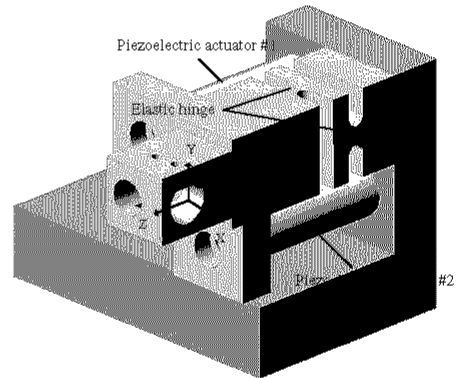


Fig. 2 Solid model of the elliptical vibration assisted cutting tool post

2.2.1 탄성힌지의 강성설계

탄성힌지부위의 치수설계를 위하여 Paros 와 Weisbord 가 제시한 탄성힌지의 설계법을 사용하였다[3]. Fig. 3a 와 같이 두께 t , 반경 r , 너비 b 그리고 높이 h 인 탄성힌지의 컴플라이언스 C_θ 는 식 (3)과 같으며, 식 (4)와 같은 조건을 만족할 때 식 (3)은 식 (5)와 같이 간단히 표현된다.

$$C_\theta = \frac{\alpha}{M} = \frac{3}{2Ebr^2} \left[\frac{1}{2\beta + \beta^2} \right] \left\{ \left[\frac{3 + 4\beta + 2\beta^2}{(1 + \beta)(2\beta + \beta^2)} \right] + \left[\frac{6(1 + \beta)}{(2\beta + \beta^2)^{3/2}} \right] \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \right) \right\}, \beta = t/2r \quad (3)$$

$$\beta \leq 1, \quad \beta \leq h/2r \quad (4)$$

$$C_\theta = \frac{1}{K_\theta} = \frac{\alpha}{M} = \frac{9\pi r^3}{2Ebt^3} \quad (5)$$

여기서 E 는 Young's Modulus, M 은 모멘트, 그리고 α 는 회전각이다. 본 연구에서 제작된 탄성힌지의 소재는 $E=206\text{ GPa}$ 의 SM45C이며, 공구대의 구체적인 설계치수는 각각 $b=25\text{ mm}$, $h=10\text{ mm}$, $r=2.5\text{ mm}$, $t=5\text{ mm}$, $l=58.5\text{ mm}$ 을 적용하였다. 설계조건에 따라 식(3)을 이용하여 굽힘강성을 계산한 결과 $K_\theta=16.43\text{ MN}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 으로 나타났으며, 이를 이용하여 Fig. 3b에 나타난 것처럼 x 방향으로의 최대이송변위를 식(6)를 이용하여 계산하였다. 이때 공구대의 z 축방향의 강성과 구동기로 사용된 압전액츄에이터의 강성에 의해서 255N의 힘이 공구대의 레버아암에 작용하는 것으로 볼 수 있으며 $d=23.5\text{ mm}$ 인 점을 고려할 때, 설계된 공구대의 최대이송변위는 $21\text{ }\mu\text{m}$ 이며, 이는 설계목표인 최대 $20\text{ }\mu\text{m}$ 의 이송조건을 만족하고 측정실험의 결과치인 $23.6\text{ }\mu\text{m}$ 과 유사함을 알 수 있다.

$$Fd = \frac{1}{C_\theta} \alpha = \frac{x}{C_\theta l} \quad (6)$$

$$x = FdlC_\theta$$

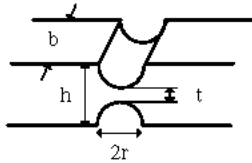


Fig. 3a The dimensions of the elastic hinge

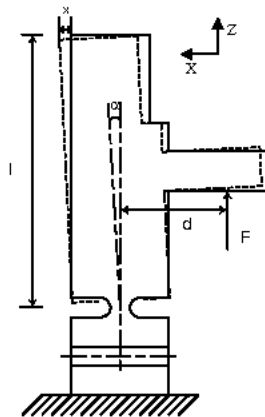


Fig. 3b Deflection of the lever arm in the tool post when the force F is applied at the distance d apart from the centerline

2.2.2 진동절삭 공구대의 공진주파수 설계

설계된 진동절삭 공구대가 안정적으로 진동제적을 구현할 수 있는 주파수영역을 알아보기 위해서 각각의 운동방향에 대한 공구대의 공진주파수를 계산하였다. 탄성힌지를 갖는 공구대에 대해서 질량-스프링계로 모델링 하였으며 이때의 공진주파수는 식(7)과 같다.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

$$Wl = \frac{\alpha}{C_\theta}, \quad \alpha = \frac{x}{l} \quad (8)$$

$$k_{x,y} = \frac{W}{x} = \frac{1}{C_\theta l^2} \quad (9)$$

여기서 $k_{x,y}$ 는 이송축방향의 강성, m 은 구동부의 질량, W 는 공구대의 끝단에 작용하는 힘을 나타낸다. 설계된 공구대의 경우 이송변위 x 는 길이 l 에 비해서 상당히 작으므로 회전각 α 는 식(8)과 같다. 따라서 각각의 이송방향에 대한 강성은 식(9)로부터 $k_x=4.8\text{ kN}/\text{mm}$, $k_y=3.5\text{ kN}/\text{mm}$ 이며 질량은 $m_x=0.237\text{ kg}$, $m_y=0.304\text{ kg}$ 으로 이론적으로 구한 공진주파수는 x 방향에 대해 667.4 Hz , y 방향에 대해 540.1 Hz 이다. 이 값은 측정실험결과와 비교할 때 최대 2.3%의 오차를 가지며 최대 구동주파수 500 Hz 의 설계조건을 충족시킴을 알 수 있다.

2.3 성능실험을 위한 시스템 구성도

제작된 진동절삭 공구대의 진동제적 성능실험을 위해서 Fig. 4와 같은 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 크게 사용자와의 인터페이스를 담당하는 PC, 사용자가 설정한 정현파를 아날로그 출력값으로 변환하는 고속 D/A (Digital to Analog) 변환기, 압전액츄에이터의 구동을 위한 고전압 증폭기, 진동절삭 공구대, 진동제적을 측정하는 정전용량형 변위센서, 그리고 센서출력값을 기록하는 오실로스코프로 나누어진다. 사용자와의 인터페이스를 담당하는 PC 부분은 윈도우 기반의 진동절삭 공구대의 제어시스템으로 공구대 끝단에 사용자가 원하는 진동제적을 발생시키기 위해 해당 파라미터를 설정할 수 있다. 고속 D/A 변환기는 최대 20 kHz 의 주파수로 공구대를 가진할 수 있도록 고속의 D/A 변환을 수행하며 고전압 증폭기는 진동절삭 공구대에 장착된 압전액츄에이터의 구동을 위해 입력전압을 100배까지 증폭시키고 압전액츄에이터 구동시 필요한 전류를 공급한다. 정전용량형 센서는 가진 주파수 20 kHz 의 진동제적까지 정밀하게 측정할 수 있도록 충분한 대역폭과 분해능을 가지고 있다.

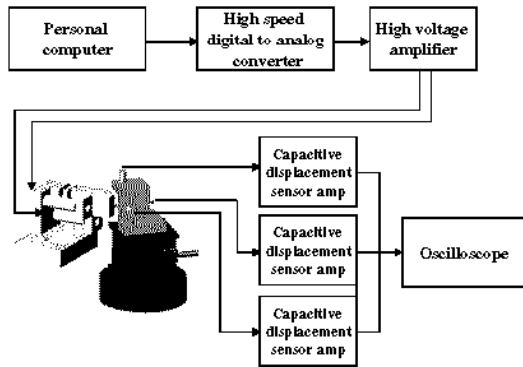


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus for elliptical vibration cutting tool post

2.4 성능실험 결과

성능실험장치를 이용하여 제작된 진동절삭 공구대의 진동체적을 측정하였다. 설계된 진동절삭 공구대의 경우 주 제적평면이 XY 평면으로 예상되나 공구대의 굽힘에 의한 z 축방향성분을 고려하여 Fig. 4 와 같이 3 차원 각축방향의 이송변위를 측정하였다. 각축방향의 변위는 각축방향에 설치된 정전용량형 변위센서로부터 측정되며 센서의 값은 오실로스코프를 사용하여 획득하였다. Fig. 5 는 주파수 500 Hz, 위상차 90°에서 각각 10 μm×10 μm, 10 μm×2.5 μm 의 변위를 갖는 정현파를 발생시켜 주 제적평면에서 이송변위를 측정된 결과를 나타낸다. Fig. 5 에서 알 수 있듯이 각축의 정현파의 형상이 왜곡되지 않고 정확하게 사용자가 입력한 신호를 생성함을 알 수 있다. Fig. 6 은 공구대의 이송변위를 XY 평면상에서 측정된 결과로 원 및 타원의 진동체적이 뚜렷하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 공진주파수 이하의 영역에서는 공구대의 이송을 비연성(decoupled)된 상태에서 직교하는 두 축에 대해 평행한 방향으로 유도함으로써 개별적인 이송제어가 가능함을 의미하며 향후 다양한 진동체적을 진동절삭 가공실험에 적용할 수 있음을 보여준다.

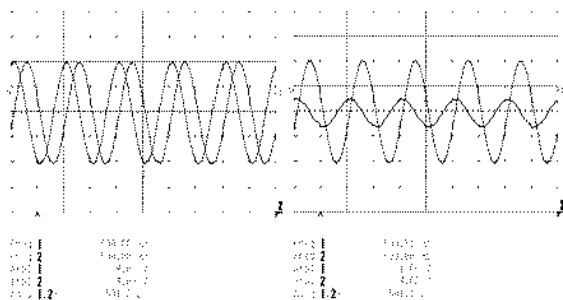


Fig. 5 The measured wave shape of displacement value(1V/div, 2.5 μm/V)

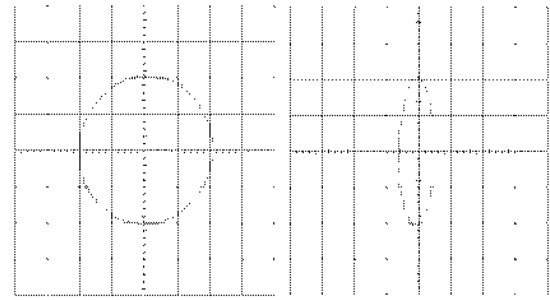


Fig. 6 The measured vibration locus of tool post in XY plane (1V/div, 2.5 μm/V)

3. 결론

본 연구에서는 제시된 2 차원 진동절삭 가공방식의 특성을 알아보기 위해서 절삭공구에 다양한 형태의 진동체적을 발생시킬 수 있는 새로운 형태의 진동절삭 공구대를 설계, 제작하였다. 강성계산을 통한 탄성한지 설계로 각각의 이송방향에 대해서 최대 10 μm이상의 진폭과 500 Hz이상의 구동주파수를 인가할 수 있도록 설계하였으며, 성능실험 결과 설계 제작된 진동절삭 공구대는 설계목표인 구동주파수에서 반경 5 μm이상의 원에서부터 장·단축이 각각 10 μm, 2.5 μm인 타원에 이르기까지 사용자가 원하는 다양한 진동체적을 구현할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 연구지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Shamoto, E., Morimoto, Y. and Moriwaki, T., "Elliptical vibration cutting (1st Report) - cutting principle and basic performance," JSPE, Vol.62, No.8, pp.1127-1131, 1996
2. Dow, Negishi and Sohn, "Elliptical vibration assisted diamond turning," Proceedings of 2002 ASPE Annual Meeting, Vol.25, pp.92-97, 2002
3. Paros, J. M. and Weisbord, L., "How to design flexure hinges," Machine Design, No. T-27, pp.151-156, 1965